

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Bojan Bašić**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv.prof. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Student:

Bojan Bašić

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svojim roditeljima, Lucianu i Ljiljani te sestri Maji na svim odricanjima i ukazanom povjerenju, bezuvjetnoj podršci i razumjevanju bez kojih završetak ovog studija ne bi bio moguć.

Zahvaljujem se mentorici prof.dr.sc. Veri Rede na stručnoj pomoći i savjetima tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se djevojci Ivani, cimerima i prijateljima na svim zabavama i veselim trenucima koje smo zajedno prošli, kao i na potpori onda kada je bila potrebna. Svi vi ste moja velika obitelj bez kojih bi studij bio neusporedivo teži.

Bojan Bašić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Bojan Bašić** Mat. br.: 0035187140

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza mikrostrukture zavarenog spoja Corten čelika**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Microstructural Analysis of a Corten Steel Weld**

Opis zadatka:

Corten čelik je naziv za grupu niskolegiranih konstrukcijskih čelika koji zbog sadržaja određenih legiranih elemenata imaju povišenu otpornost na djelovanje atmosferske korozije. Pri izlaganju atmosferskim uvjetima na površini ovih čelika stvara se oksidni sloj koji je relativno stabilan i koji štiti površinu od daljnjeg prodiranja korozije. Najčešće se koriste u arhitekturi za unutarnje i vanjske obloge, a zbog vrlo lijepe i atraktivne boje oksidnog sloja često se koriste za izradu umjetničkih djela.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je analizirati mikrostrukturu zavarenog spoja Corten čelika (osnovni materijal, zonu utjecaja topline i metal zavara). Također je potrebno analizirati i usporediti oksidni sloj na osnovnom materijalu i u području zavarenog spoja na uzorcima koji su kroz određeno vrijeme bili izloženi djelovanju atmosfere u ruralnom, industrijskom i morskom okruženju.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

28. rujna 2017.

Zadatak zadao:

*Rede*

Izv. prof. dr. sc. Vera Rede

Datum predaje rada:

30. studenog 2017.

Predviđeni datum obrane:

6., 7. i 8. prosinca 2017.

Predsjednica Povjerenstva:

*Biserka Runje*  
Prof. dr. sc. Biserka Runje



## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	3
POPIS TABLICA.....	6
POPIS OZNAKA .....	7
SAŽETAK .....	8
SUMMARY .....	9
1. UVOD.....	10
2. OPĆI KONSTRUKCIJSKI ČELIK .....	11
2.1. Opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije.....	11
2.2. Čelici za strojogradnju .....	13
3. KOROZIJA .....	14
3.1. Općenito o koroziji.....	14
3.2. Vrste i oblici korozije.....	17
3.3. Atmosferska korozija .....	22
4. CORTEN ČELIK .....	24
4.1. Vrste Corten čelika.....	26
4.2. Zavarivanje Corten čelika.....	28
4.3. Primjena Corten čelika .....	32
4.4. Čelik S355J0WP .....	35
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	36
5.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja.....	36
5.2. Materijal za ispitivanje .....	36
5.3. Vizualna usporedba površine uzoraka.....	41
5.4. Analiza kemijskog sastava .....	46
5.5. Analiza makrostrukture .....	47
5.6. Analiza mikrostrukture.....	49
5.5.1. Priprema metalografskih uzorka.....	49
5.5.2. Analiza na svjetlosnom mikroskopu.....	52

5.5.3. Analiza na pretražnom elektronskom mikroskopu .....	65
5.7. Mjerenje tvrdoće .....	74
5.8. Ispitivanje mehaničkih svojstava .....	75
6. OSVRT NA REZULTATE.....	77
7. ZAKLJUČAK .....	80
8. LITERATURA.....	81
PRILOZI .....	84

## POPIS SLIKA

Slika 1. Troškovi uzrokovani korozijom 2003. god u SAD-u .....	17
Slika 2. Podjela korozije .....	18
Slika 3. Faktori koji utječu na brzinu atmosferske korozije .....	23
Slika 4. Stvaranje zaštitnog korozijskog sloja i promjena boje tijekom godina [18].....	25
Slika 5. REL postupak zavarivanja [24] .....	28
Slika 6. Oprema za MAG postupak zavarivanja [28] .....	30
Slika 7. Primjena Corten čelika [33] .....	32
Slika 8. Barclays Center (lijevo) i Broadcasting Tower u Leeds-u (desno) [35], [36] .....	33
Slika 9. Most George na rijeci Kanawaha (Zapadna Virginia, SAD) [37].....	33
Slika 10. P.Picasso - The Chicago Picasso (lijevo), A.Gormley - Angel of North (desno) [40], [41] .....	34
Slika 11. R.Indiana - Love (lijevo), R.Serra - Lukovi (desno) [42], [43].....	34
Slika 12. Shematski prikaz pripreme spoja i zavarivanja u PC položaju .....	37
Slika 13. Zavarena ploča od čelika S355J0WP – tjeme zavora .....	38
Slika 14. Zavarena ploča od čelika S355J0WP – korijen zavora.....	38
Slika 15. Uzorci iz osnovnog materijala (bez zavora).....	39
Slika 16. Uzorci sa zavarom – tjeme zavora .....	40
Slika 17. Uzorci sa zavarom – korijen zavora.....	40
Slika 18. Uzorci sa zavarenim spojem nakon 15 dana izlaganja djelovanju morske (a) i industrijske (b) atmosfere .....	42
Slika 19. Osnovni materijal nakon 15 dana izlaganja djelovanju morske (a) i industrijske (b) atmofere.....	42
Slika 20. Uzorci nakon 40 dana izlaganja djelovanju morske (a i c) i industrijske (b i d) atmofere.....	43
Slika 21. Osnovni materijal nakon 40 dana izlaganja djelovanju morske (a) i industrijske (b) atmofere.....	43
Slika 22. Uzorci nakon 90 dana izlaganja djelovanju morske (a i c) i industrijske (b i d) atmofere.....	44
Slika 23. Osnovni materijal nakon 90 dana izlaganja djelovanju morske (a) i industrijske (b) atmofere.....	44
Slika 24. Uzorci nakon 200 dana izlaganja djelovanju ruralne (a), industrijske (b) i morske (c) atmofere.....	45
Slika 25. Uzorci sa zavarom (tjemena strana) nakon 200 dana izlaganja djelovanju ruralne (a), industrijske (b) i morske (c) atmosfere.....	45
Slika 26. Uzorci sa zavarom (korijenska strana) nakon 200 dana izlaganja djelovanju ruralne (a), industrijske (b), i morske (c) atmosfere .....	46
Slika 27. Osnovni materijal nakon 200 dana izlaganja djelovanju ruralne (a), industrijske (b) i morske (c) atmosfere .....	46
Slika 28. Uzorak nakon nagrizanja.....	48
Slika 29. Uzimanje uzoraka za metalografsku analizu.....	49
Slika 30. Brušenje uzoraka .....	50

Slika 31. Metalografski uzorci nakon poliranja.....	51
Slika 32. Pozicije za analizu oksidnog sloja .....	52
Slika 33. Oksidni sloj na poziciji 1 (ruralna atmosfera).....	53
Slika 34. Oksidni sloj na poziciji 2 (ruralna atmosfera).....	53
Slika 35. Isto kao slika 33 uz veće povećanje.....	53
Slika 36. Oksidni sloj na poziciji 3 (ruralna atmosfera).....	54
Slika 37. Oksidni sloj na tjemenu zavora (pozicija 4).....	54
Slika 38. Oksidni sloj na korijenu zavora (pozicija 5).....	54
Slika 39. Oksidni sloj na poziciji 1 (industrijska atmosfera).....	55
Slika 40. Oksidni sloj na poziciji 2 (industrijska atmosfera).....	55
Slika 41. Oksidni sloj na poziciji 3 (industrijska atmosfera).....	55
Slika 42. Isto kao slika 41 uz veće povećanje.....	56
Slika 43. Oksidni sloj na tjemenu zavora (pozicija 4).....	56
Slika 44. Oksidni sloj na korijenu zavora (pozicija 5).....	56
Slika 45. Isto kao slika 44 uz veće povećanje.....	57
Slika 46. Oksidni sloj na poziciji 1 (morska atmosfera) .....	57
Slika 47. Oksidni sloj na poziciji 2 (morska atmosfera) .....	58
Slika 48. Isto kao i slika 47 uz veće povećanje.....	58
Slika 49. Oksidni sloj na poziciji 3 (morska atmosfera) .....	58
Slika 50. Isto kao slika 49 uz veće povećanje.....	59
Slika 51. Oksidni sloj na tjemenu zavora (pozicija 4).....	59
Slika 52. Oksidni sloj na korijenu zavora (pozicija 5).....	59
Slika 53. Isto kao slika 52 uz veće povećanje.....	60
Slika 54. Mikrostruktura osnovnog materijala okomito na smjer valjanja.....	60
Slika 55. Isto kao i slika 54 uz veće povećanje.....	61
Slika 56. Mikrostruktura osnovnog materijala u smjeru valjanja .....	61
Slika 57. Isto kao i slika 56 uz veće povećanje.....	62
Slika 58. Mikrostruktura zone utjecaja topline, tjeme zavora.....	62
Slika 59. Mikrostruktura zone utjecaja topline, sredina zavora .....	63
Slika 60. Mikrostruktura zone utjecaja topline, korijen zavora .....	63
Slika 61. Mikrostruktura metala zavora, tjeme zavora .....	64
Slika 62. Mikrostruktura metala zavora, sredina zavora.....	64
Slika 63. Mikrostruktura metala zavora, korijen zavora.....	65
Slika 64. Debljina oksidnog sloja (ruralna atmosfera) .....	66
Slika 65. Rezultati EDS analize osnovnog materijala i oksidnog sloja (Fe - crveno, O - plavo) ..	66
Slika 66. Oksidni sloj na tjemenu zavora (a) i korijenu zavora (b) (ruralna atmosfera) .....	67
Slika 67. Rezultati EDS analize na tjemenu zavora (Fe – crveno, O – žuto) .....	67
Slika 68. Rezultati EDS analize na korijenu zavora (Fe – crveno, O – žuto).....	68
Slika 69. Debljina oksidnog sloja (industrijska atmosfera).....	68
Slika 70. Rezultati EDS analize osnovnog materijala i oksidnog sloja (Fe – crveno, O – žuto)..	69
Slika 71. Oksidni sloj na tjemenu zavora (a) i korijenu zavora (b) (industrijska atmosfera) .....	70
Slika 72. Rezultati EDS analize na tjemenu zavora (Fe – žuto, O – plavo) .....	70
Slika 73. Rezultati EDS analize na korijenu zavora (Fe – crveno, O – plavo) .....	71
Slika 74. Debljina oksidnog sloja (morska atmosfera).....	72
Slika 75. Rezultati EDS analize osnovnog materijala i oksidnog sloja (Fe – plavo, O – ljubičasto)	72

---

Slika 76. Oksidni sloj na tjemenu zavar (a) i korijenu zavar (b) (morska atmosfera) .....	73
Slika 77. Rezultati EDS analize na tjemenu zavar (Fe – crveno, O – zeleno) .....	73
Slika 78. Rezultati EDS analize na korijenu zavar (Fe – crveno, O – žuto) .....	74
Slika 79. Kidalica "Wolpert" .....	76
Slika 80. Razlike u intenzitetu korozije između osnovnog materijala i metala zavar (lijevo-ruralna, sredina-industrijska, desno-morska atmosfera) .....	78

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Unutarnji i vanjski faktori [7] .....	15
Tablica 2. Stupnjevi otpornosti na opću koroziju [3] .....	16
Tablica 3. Troškovi korozije prema metodama zaštite u SAD-u [5] .....	22
Tablica 4. Kemijski sastav Corten-A čelika .....	26
Tablica 5. Mehanička svojstva Corten-A čelika pri sobnoj temperaturi .....	26
Tablica 6. Kemijski sastav Corten-B čelika .....	27
Tablica 7. Mehanička svojstva Corten-B čelika .....	27
Tablica 8. Kemijski sastav čelika S355J0WP po normi EN 10025-5:2004 .....	35
Tablica 9. Mehanička svojstva čelika S355J0WP po normi EN 10025-5:2004 .....	35
Tablica 10. Kemijski sastav čelika zajamčen od strane proizvođača .....	37
Tablica 11. Mehanička svojstva osnovnog materijala zajamčena od strane proizvođača .....	37
Tablica 12. Rezultati analize kemijskog sastava čelika S355J0WP .....	47
Tablica 13. Brušenje .....	50
Tablica 14. Poliranje .....	50
Tablica 15. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće .....	75
Tablica 16. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja .....	75
Tablica 17. Tablica zavarivanja .....	84

**POPIS OZNAKA**

Oznaka:	Jedinica:	Opis:
$R_e$	$\text{N/mm}^2$	granica razvlačenja
$R_m$	$\text{N/mm}^2$	vlačna čvrstoća
$R_{mt}$	$\text{N/mm}^2$	tlačna čvrstoća
$R_{ms}$	$\text{N/mm}^2$	savojne čvrstoće
$R_{mu}$	$\text{N/mm}^2$	smične čvrstoće
$KV$	J	udarna radnja loma
$\sigma$	$\text{N/mm}^2$	naprezanje
$F$	N	sila
$\varepsilon$	mm/mm	istezanje
A	%	istezljivost
$v_p$	mm/god	prosječna brzina prodiranja korozije
l	mm	debljina sloja izmjerena na SEM-u
U	V	napon struje
v	mm/s	brzina zavarivanja

## SAŽETAK

Cilj rada je bio analizirati mikrostrukturu zavarenog spoja Corten čelika oznake S355J0WP (osnovni materijal, zonu utjecaja topline i metal zavora). Također je analiziran i uspoređen oksidni sloj na osnovnom materijalu i u području zavarenog spoja na uzorcima koji su kroz 200 dana bili izloženi djelovanju atmosfere u ruralnom, industrijskom i morskom okruženju.

U teorijskom dijelu rada opisani su opći konstrukcijski čelici, te oblici i vrste korozije. Poseban naglasak stavljen je na čelike s povišenom otpornošću na atmosfersku koroziju. Opisane su vrste Corten čelika, stvaranje oksidnog sloja na površini, postupci zavarivanja te područja primjene.

U eksperimentalnom dijelu rada prikazani su rezultati dobiveni vizualnim pregledom korodiranih površina, rezultati analize kemijskog sastava, analize mikrostrukture, EDS analize i rezultati statičkog vlačnog ispitivanja.

Pokazalo se da vrsta atmosfere ima vrlo veliki utjecaj na intenzitet korozije i kvalitetu nastalih oksidnih slojeva na površini Corten čelika. Najtanji oksidni sloj i najravnomjernija prekrivenost površine korozijskim produktima postignuta je u ruralnoj atmosferi, a najmanja homogenost i najveća dubina korozije u morskoj atmosferi.

**Ključne riječi:** Corten čelik, atmosferska korozija, analiza mikrostrukture, zavareni spoj



## SUMMARY

The aim of the paper was to analyze the microstructure of the welded joint of the Corten steel grade S355J0WP (base metal, heat-affected zone and weld metal). The oxid layer on the base material and oxid layer in the weld area on samples that were exposed to atmospheric influence in the rural, industrial and marine environment for 200 days was also analyzed and compared.

Theoretical part of the paper describes general structural steels, and forms and types of corrosion. Special emphasis was placed on steels with increased resistance to atmospheric corrosion. In this part, types of Corten steel, the formation of an oxide layer on the surface, welding processes and application areas were described.

In the experimental part, the results obtained by visual inspection of corroded surfaces, results of chemical composition analysis, microstructure analysis, EDS analysis and static tensile test results are presented.

It has been shown that the type of atmosphere has a great influence on the corrosion intensity and the quality of the oxide layers formed on the Corten steel surface. The thinnest oxide layer and the most uniform surface coverage of corrosion products was achieved in the rural atmosphere, with the lowest homogeneity and the greatest depth of corrosion in the marine atmosphere.

**Key words:** Corten steel, atmospheric corrosion, microstructural analysis, welded joint

## 1. UVOD

Prilikom planiranja, konstruiranja i izrade proizvoda veliku ulogu ima izbor materijala od kojega će proizvod biti izrađen. Mehaničke konstrukcije i ostali proizvodi koji su namijenjeni za korištenje na otvorenom prostoru podliježu korozijskom djelovanju atmosfere. Jedan od najčešćih uzroka oštećenja konstrukcijskih materijala u eksploataciji je korozija.

Kako bi proizvod u eksploataciji mogao ispunjavati svoju predviđenu funkciju on se treba ispravno održavati, pri čemu je nužno oštećene ili dotrajale dijelove zamijeniti novima. Troškovi materijala mogu iznositi i do 60 % ukupnih troškova održavanja.

Konstrukcijski čelici s povišenom otpornosti na atmosfersku koroziju uvelike mogu smanjiti troškove održavanja konstrukcijskih dijelova koji su oštećeni djelovanjem atmosfere. Primjenom takvih čelika postiže se jednostavno održavanje konstrukcije s niskim troškovima održavanja. Najveća prednost čelika s povišenom otpornošću na djelovanje atmosferske korozije je to što ih nije potrebno čistiti te na njih nije potrebno nanositi premaze i boje koji mogu biti štetni za okoliš. Djelovanjem atmosfere, na površini konstrukcijskog materijala formiraju se željezni oksidi različitog sastava. Oksidi imaju karakterističnu boju koja se s vremenom mijenja, što daje veoma zanimljiv estetski izgled konstrukcije. Promjene boje najveće su na početku, a s vremenom se intenzitet promjene smanjuje i nakon otprilike 2 godine postiže se manje-više konačna boja. Kod ovih čelika oksidi relativno dobro prijanjaju uz površinu i ljuskaju se puno manje nego kod čelika koji nemaju povišenu otpornost na atmosfersku koroziju. Zbog toga se koriste za izradu raznih konstrukcija, mostova, vanjskih i unutarnjih obloga zgrada i sl.

Estetičnost proizvoda ili konstrukcije jedno je od osnovnih skupina kriterija za izbor materijala. Posebno je važna za konkurentnost proizvoda široke potrošnje, a manifestira se dimenzionalnim skladom, bojom, sjajem, stanjem površine i sl. Ukoliko se bira materijal za izradu konstrukcije koja će biti vidljiva vrlo je bitan njezin estetski izgled i način na koji će se po boji, obliku i veličini, uklopiti u okolinu.

Upravo zbog svog zanimljivog estetskog izgleda i boje, koja s vremenom poprima toplu smeđe-crvenu nijansu, konstrukcijski čelici s povišenom otpornosti na djelovanje atmosferske korozije, koriste se i za izradu različitih umjetničkih dijela [1].

## 2. OPĆI KONSTRUKCIJSKI ČELIK

Opći konstrukcijski čelici spadaju u skupinu konstrukcijskih čelika koji mogu biti nelegirani, ugljični čelici s masenim udjelom ugljika manjim od 0,6 % ( $< 0,6 \%C$ ) i legirani čelici koji mogu sadržavati legirne elemente kao što su mangan (Mn), krom (Cr), silicij (Si), nikal (Ni) i volfram (W) u manjoj količini [2]. Ti čelici koriste se za izradu konstrukcijskih dijelova kao što su osovine, vratila, opruge, vijci, zupčanici, nosači, poklopci, kućišta i sl.

Opći konstrukcijski čelici najzastupljeniji su u proizvodnji od svih čelika (65-80 % mase) te se najčešće koriste za izradu nosivih zavarenih konstrukcija visoke mase kao što su nosači, dizalice, mostovi, brodske konstrukcije i slično. Postoje dvije skupine općih konstrukcijskih čelika, a to su: opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije i čelici za strojogradnju. [3]

### 2.1. Opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije

U ovu skupinu općih konstrukcijskih čelika spadaju nelegirani čelici koji nemaju propisani kemijski sastav, ali imaju zajamčena mehanička svojstva. S obzirom na primjenu, trebaju imati dovoljno visoke vrijednosti granice razvlačenja ( $R_e$ ), vlačne čvrstoće ( $R_m$ ), tlačne čvrstoće ( $R_{mt}$ ), savojne čvrstoće ( $R_{ms}$ ), smične čvrstoće ( $R_{mu}$ ) i udarnog rada loma (žilavosti - KV ili KU) osobito pri niskim temperaturama. Od tehnoloških svojstava kod ovih čelika najvažnija je zavarljivost i hladna oblikovljivost, odnosno prikladnost za savijanje, duboko vučenje, kovanje i slično.

Budući da se današnje konstrukcije uglavnom spajaju zavarivanjem, dobra zavarljivost je jedno od najvažnijih svojstava ove skupine čelika. Vrijednost  $C_{ekv}$  treba biti manja od 0,4. To ne znači da se čelici s  $C_{ekv} > 0,4$  ne mogu zavarivati, već da se pri zavarivanju takvih čelika trebaju primijeniti posebne mjere opreza (predgrijavanje i slično). Budući da udio ugljika ( $\%C$ ) i stupanj legiranosti čelika utječu na vrijednosti  $C_{ekv}$  i prokaljivosti, njihove vrijednosti trebaju biti što niže.

Vrijednost  $C_{ekv}$  najčešće se računa po formuli (2.1):

$$C_{ekv} = \%C + \frac{\%Mn}{4} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{6} < 0,4 \quad (2.1)$$

Opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije imaju feritno-perlitnu mikrostrukturu sa što sitnijim zrnom. Kako bi se postigla takva mikrostruktura, nakon toplog oblikovanja treba provesti postupak normalizacijskog žarenja. Sitnozrnatost se može poboljšati posebnim smirivanjem uz dodatak aluminija koji stvara aluminijev nitrid (AlN) i sprječava rast zrna pri kasnijim ugrijavanjima. Ovi čelici nisu predviđeni za toplinsku obradu zbog toga što imaju nezajamčeni kemijski sastav i visoki udio nečistoća i nehomogenosti u mikrostrukтури [3].

Svojstva općih konstrukcijskih čelika su [4]:

- dobra nosivost i sigurnost, što znači visoke vrijednosti vlačne čvrstoće, granice razvlačenja i žilavosti,
- odgovarajuća vrijednost „plastične rezerve“ tj. povoljan omjer granice razvlačenja i vlačne čvrstoće ( $R_e/R_m = 0,70...0,85$ ),
- relativno velika istezljivost (A),
- dovoljno visoka sigurnost od krhkog loma tj. veliku površinu ispod krivulje u  $\sigma$ - $\epsilon$  dijagramu

Vrijednosti mehaničkih svojstava za cijelu skupinu čelika kreću se u rasponima:

- $R_e = 190-370 \text{ N/mm}^2$
- $R_m = 330-700 \text{ N/mm}^2$
- $A_5 = 10-28 \%$

Vrijednosti granice razvlačenja ( $R_e$ ) ovise o kemijskom sastavu čelika, prvenstveno o udjelu ugljika (%C). Ovise također i o udjelu perlita u mikrostrukтури, te o dimenzijama konstrukcijskog dijela.

Ovi čelici se primjenjuju u temperaturnom intervalu od  $-40$  do  $+50$  °C. Kod primjene na sniženim temperaturama povećana je opasnost od krhkog loma. Što je viši maseni udio ugljika i udio perlita, više su i vrijednosti granice razvlačenja ( $R_e$ ). Dodatkom mangana (Mn) i silicija (Si) postiže se viša čvrstoća, s time da udio mangana ne smije prijeći 1,65 % jer povisuje prokaljivost i opasnost od spontanog zakaljivanja pri zavarivanju. Kod ovih čelika važan je omjer masenih udjela mangana i ugljika. Što je viši omjer Mn/C, to je veća žilavost (udarni rad loma). Ovo je osobito važno pri nižim temperaturama jer se smanjuje opasnost od krhkog loma. Čelici s manjim masenim udjelom ugljika i nečistoća imaju veću otpornost na krhki lom [3].

Standardne oznake općih konstrukcijskih čelika sastoje se od glavne oznake, dodatne oznake za čelik i dodatne oznake za čelični proizvod. Osnovna oznaka počinje sa slovom „S“, iza čega

sljedi troznamenasti broj koji predstavlja minimalnu granicu razvlačenja za područje najmanjih debljina. U dodatnoj oznaci, prva dva znaka ukazuju na vrijednost zajamčenog udarnog rada loma pri određenoj temperaturi. Po potrebi, dodatna oznaka može sadržavati simbole za detaljnije označavanje čelika [3].

Oznake nekoliko čelika iz ove skupine navedene su u nastavku:

- S185 – čelik bez zajamčenih svojstava
- S235JRG1 – čelik za statički manje opterećene konstrukcije
- S275JRG2 – čelik za tlačno i savojno opterećene zavarene konstrukcije gdje nema opasnosti od krhkog loma; zajamčeni udarni rad loma pri +20 °C
- S355J0G3 – čelik za statički i dinamički opterećene zavarene konstrukcije; zajamčeni udarni rad loma pri 0 °C
- S355J2G3 – čelik za statički i dinamički opterećene odgovorne zavarene konstrukcije; zajamčeni udarni rad loma pri -20 °C

## 2.2. Čelici za strojogradnju

Ova podskupina općih konstrukcijskih čelika primjenjuje se za izradu konstrukcijskih dijelova koji se gibaju u odnosu na druge dijelove (npr. osovine u kliznim ležajevima, vretena, manje opterećeni zupčanici) ili prenose sile i momente (npr. klinovi, vijci, zatici, ručice, poluge i sl.). Čelici za strojogradnju, u odnosu na opće konstrukcijske čelike za nosive konstrukcije, imaju lošiju zavarljivost zbog većeg masenog udjela ugljika. Iz istog razloga imaju i višu vlačnu čvrstoću ( $R_m = 500-700 \text{ N/mm}^2$ ) te nižu istezljivost ( $A = 10-20 \%$ ). Prema normama nema zahtjeva na zavarljivost i žilavost. Iako imaju viši udio ugljika čelici ove skupine nisu namijenjeni kaljenju [3].

Osnovna oznaka ove podskupine čelika počinje slovom E, a iza nje sljedi troznamenasti broj koji predstavlja minimalnu vrijednost granice razvlačenja za područje najmanjih debljina. Oznake nekoliko čelika iz ove podskupine su: E295, E355, E360.

### 3. KOROZIJA

#### 3.1. Općenito o koroziji

Konstruktivski materijali podložni su nenamjernim štetnim promjenama, tj. pojavama i procesima koji smanjuju njihovu uporabnu vrijednost. Proces koji najčešće zahvaća konstrukcijske materijale je korozija koja razara materijal nakon čega on postaje neupotrebljiv za namjenu radi koje je nastao [5]. Korozija je proces nenamjernog razaranja materijala, uzrokovan fizikalnim, kemijskim ili biološkim djelovanjem [5].

Koroziju čini skup kemijskih i elektrokemijskih promjena tijekom kojih metal prelazi od elementarnog stanja u spojeve u kojima se najčešće nalazi u prirodi. Taj proces najčešće nastaje zbog kemijskog djelovanja okoline na materijal te je često povezan s fizikalnim ili biološkim oštećivanjem koje se može odvijati istodobno s korozijom (abrazija, erozija, kavitacija, djelovanje topline, mehaničko djelovanje, UV-zračenje i slično).

Riječ korozija dolazi od latinskog glagola *corrodere* što znači nagristi. Proces korozije se teško može potpuno spriječiti ali se može dovoljno usporiti površinskom zaštitom materijala i nekim drugim postupcima [6].

Za usporavanje korozije koriste se razne metode zaštite materijala za čiji razvitak i primjenu je potrebno znati što izaziva razaranje materijala, tj. koroziju. Kako bi došlo do procesa razaranja konstrukcijskih materijala u sustavu treba postojati fizikalna, kemijska, biološka ili neka druga pokretačka sila koja je uzrok korozije. Brzina razaranja materijala razmjerna je upravo toj sili (npr. razlici potencijala). Ovisno o veličini fizikalnih ili kemijskih otpora koji se suprotstavljaju pokretačkoj sili, materijali mogu biti aktivni, pasivni i imuni. Kod aktivnih materijala otpori nisu veliki te kod njih postoji afinitet prema koroziji. Pasivni materijali su u određenim uvjetima elektrokemijski neaktivni, dok su imuni materijali prirodno imuni na koroziju (npr. zlato, platina). Aktivni materijali korodiraju, dok pasivni materijali korodiraju jako sporo gotovo neznatnom brzinom. Pokretačka sila ovisi o unutarnjim i vanjskim faktorima razaranja koji u većoj ili manjoj mjeri direktno utječu na intenzitet korozije. U tablici 1 prikazani su neki od faktora koji utječu na brzinu i vrstu korozijskih procesa.

**Tablica 1. Unutarnji i vanjski faktori [7]**

Unutarnji faktori	Vanjski faktori
Kemijski sastav materijala	Sastav medija
Struktura materijala	Temperatura
Zaostala naprezanja	Tlak
Stanje površine	Mehanička opterećenja
Fizikalna i mehanička svojstva materijala	Brzina gibanja medija
Oblik konstrukcije, itd.	Električni naboj, radijacija, itd.

Kako bi se proces razaranja materijala korozijom usporio, pokretačka sila treba biti što manja. [7]

Brzina korozije na nekom mjestu površine materijala u određenom trenutku razmjerna je pokretačkoj sili i obrnuto razmjerna otporima koji joj se suprotstavljaju. Te veličine ovise o lokalnim i trenutačnim unutarnjim i vanjskim faktorima.

Za određivanje brzine korozije u slučaju opće korozije primjenjuje se kvantitativna metoda određivanja gubitka mase vaganjem prije i nakon izlaganja agresivnom mediju. Prosječna brzina korozije računa se po formuli (3.1) [8].

$$v = \frac{\Delta m}{S \cdot t}, \quad \left[ \frac{\text{g}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} \right] \quad (3.1)$$

$\Delta m$  – gubitak mase konstrukcijskog materijala [g]

$S$  – površina koja se troši [mm/god]

$t$  – vrijeme izlaganja agresivnom mediju u danima

Prosječna brzina prodiranja korozije u konstrukcijski materijal računa se po formuli (3.2) [8]

$$v_p = \frac{h}{t} = \frac{\Delta V}{S \cdot t} = \frac{\Delta m}{\rho \cdot S \cdot t} = \frac{v}{\rho}, \quad \left[ \frac{\text{mm}}{\text{god}} \right] \quad (3.2)$$

$h$  – dubina prodiranja [mm]

$\rho$  – gustoća materijala [g/dm<sup>3</sup>]

$\Delta V$  – gubitak volumena konstrukcijskog materijala [mm<sup>3</sup>]

Budući da na proces korozije utječe puno faktora, u literaturi se često navode kvalitativne ocjene otpornosti na koroziju za pojedine materijale. Te kvantitativne ocijene mogu poslužiti kao okvirne smjernice za izbor prikladnog materijala. Prije konačnog izbora materijala najčešće se provode dodatna laboratorijska ili eksploatacijska ispitivanja u što realnijim uvjetima djelovanja agresivnog medija [1]. U tablici 2 navedeni su stupnjevi otpornosti čelika na opću koroziju. [1], [3]

**Tablica 2. Stupnjevi otpornosti na opću koroziju [3]**

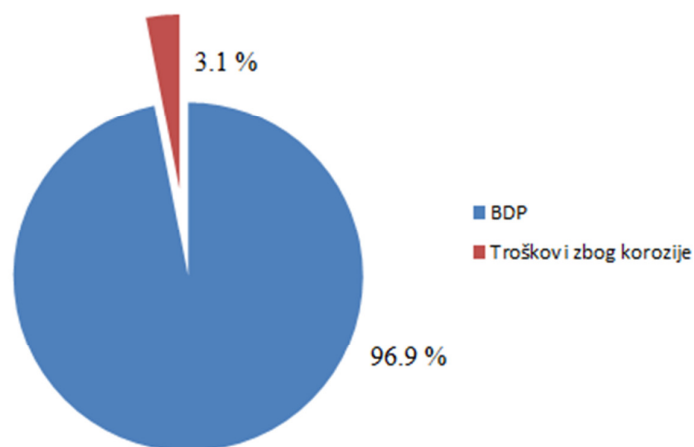
Stupanj	Opis otpornosti	Gubitak mase, [g/m <sup>2</sup> h]	Smanjenje debljine lima, [mm/god]
0	potpuna	< 0,1	< 0,11
1	praktički postojano	0,1...1,0	0,11...1,1
2	slabo postojano	1,0...10	1,1...11
3	nepostojano	> 10	> 11

Korozijski procesi izazivaju velike novčane gubitke svjetskom gospodarstvu. Troškovi koje izaziva korozija mogu se svrstati u izravne i neizravne troškove.

- Izravni troškovi su troškovi koji nastaju zbog ranije zamjene korodiranih dijelova te zbog održavanja ili zastoja tijekom kojeg se provode antikorozivne zaštitne mjere.
- Neizravni troškovi su troškovi koji nastaju zbog zaustavljanja proizvodnje i pogona, gubitka proizvoda (npr. curenje iz tankova), smanjenja stupnja iskoristivosti, onečišćavanja proizvoda i okoliša te ostalih događaja koji su posljedica djelovanja korozije.

Procjenjuje se da gubitci uzrokovani djelovanjem korozije u industrijskim zemlja iznose 3 do 5 % godišnjeg bruto domaćeg proizvoda (BDP) [6], [8]. Prema istraživanjima iz 2003. godine u Sjedinjenim Američkim Državama direktni troškovi korozije su iznosili 276 milijardi američkih dolara (USD), što je 1000 USD po stanovniku, odnosno 3,1 % BDP-a (prikazano na slici 1) [9].





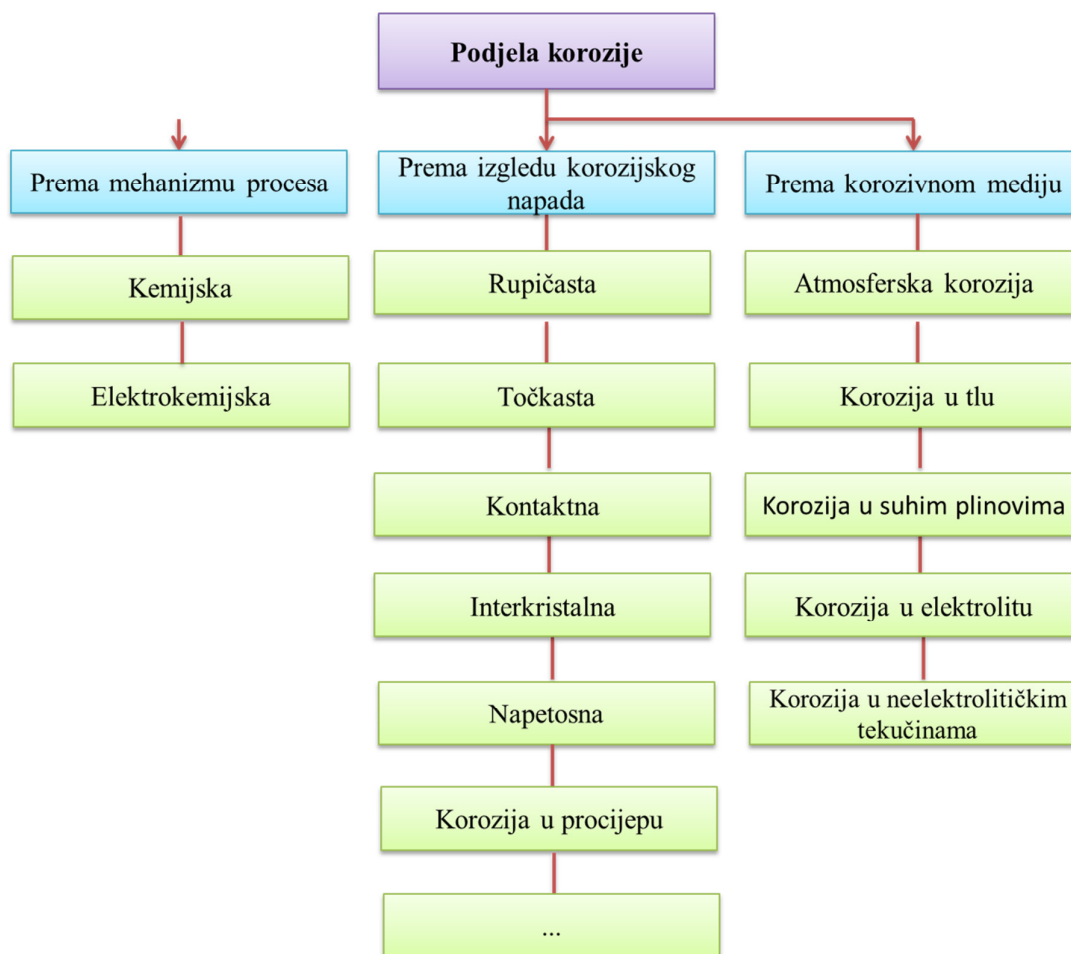
**Slika 1. Troškovi uzrokovani korozijom 2003. god u SAD-u [6]**

U te su troškove uračunati troškovi uzrokovani zamjenom oštećene opreme, primjenom antikorozivnih legura umjesto ugljičnog čelika te nanošenjem prevlaka i drugih zaštitnih mjera. Troškovi uzrokovani korozijom ne mogu se potpuno ukloniti ali se mogu značajno smanjiti pravilnom primjenom antikorozivnih mjera. Na taj način može se postići ušteda od 30-50 % po godini [6].

Prema podacima iz 2006. godine, godišnji troškovi uzrokovani korozijom u svijetu iznosili su 2200 milijardi \$, dok su 2011. godine oni iznosili 3300 milijardi \$ [10].

### **3.2. Vrste i oblici korozije**

Budući da je korozija veoma širok pojam te da postoji puno različitih vrsta i oblika korozije, ona se dijeli prema mehanizmu djelovanja, izgledu korozijskog napada i korozivnom mediju, kako je prikazano na slici 2.



Slika 2. Podjela korozije

S obzirom na to da li se događa uslijed kemijskih ili elektrokemijskih procesa, korozija može biti kemijska ili elektrokemijska.

- *Kemijska korozija* nastaje djelovanjem vrućeg i suhog zraka i plinova ili neelektrolita (npr. aceton, benzin i sl.) što dovodi do kemijskih reakcija [1]. Najčešći primjer kemijske korozije je oksidacija metala gdje pri izlaganju metala suhim plinovima koji sadrže kisik ili njegove spojeve (npr. CO<sub>2</sub>), dolazi do spajanja s kisikom. Najagresivnije djeluju vrući zrak i plinovi izgaranja. Kao proizvod takve korozije nastaju oksidi koji lako otpadaju s površine ili se čvrsto drže uz površinu metala. Slojevi koji dobro prijanjaju uz površinu usporavaju daljnju oksidaciju metala. Što je sloj deblji, daljnja oksidacija će biti sporija [11].

- *Elektrokemijska korozija* razvija se uz postojanje elektrolita (vlažni plinovi ili vodljive kapljevine), pri čemu se korodirani metal ponaša kao anoda i u obliku iona ulazi u otopinu. Elektrokemijski proces nastupa kada postoji razlika elektropotencijala dvaju kratko spojenih

galvanskih elemenata, npr. dva različita metala u elektrolitu, različiti mikrostrukturni konstituenti ili nehomogenosti u strukturi metala [11].

Prema izgledu korozijskog napada korozija može biti:

- *Opća korozija* je najčešći i najrašireniji oblik korozije te nastupa jednolično po cijeloj površini dijela. Opća korozija je najmanje opasan oblik korozije. Dubina prodiranja kod ovog oblika korozije nije proporcionalna s vremenom već se korozijski procesi odvijaju puno brže na početku nego nakon duljeg izlaganja. Zbog toga je potrebno prilikom iskazivanja iznosa korozije navesti i trajanje izlaganja materijala. Čelici s višim udjelom ugljika, u atmosferi različitih vodenih otopina te kondenzirajućih i suhih plinova, korodirat će jače u odnosu na čelike s manjim udjelom ugljika. Kako bi se postigla potpuna otpornost na opću koroziju čelik treba sadržavati najmanje 12 %Cr u čvrstoj otopini. Također treba imati homogenu monofaznu mikrostrukturu (feritnu, austenitnu ili martenzitnu) bez karbida, oksida i drugih intermetalnih faza. Monofazna mikrostruktura je potrebna kako bi se izbjegla opasnost nastanka lokaliteta čiji je elektropotencijal različit od potencijala osnovne mase čelika (tj. opasnost od pojave galvanskih članaka u strukturi). [3]

- *Rupičasta (jamičasta, točkasta) korozija* nastupa na brojnim nepredvidivim lokalitetima, a ne po cijeloj površini. Ovaj oblik korozije očituje se malim rupicama koje s vremenom prerastaju u velike rupice. Točkasta korozija uzrokovana je lokalnim nehomogenostima i diskontinuitetima u strukturi ili kemijskom sastavu osnovnog materijala i materijala zaštitnog sloja. Uz postojanje elektrolita (vodene otopine, vlažni plinovi i sl.) dolazi do mikroelektrolize zbog razlike potencijala pojedinih područja u mikrostrukturi ili materijala u spoju. Materijal se uvijek odnosi s onog dijela koji se ponaša kao anoda. Otpornost čelika na rupičastu koroziju može se procijeniti na osnovi vrijednosti tzv. djelotvorne sume elemenata (DS) koja se računa po formuli (3.3):

$$DS = \%Cr + 3,3*(\%Mo) + 30*(\%N) \quad (3.3)$$

Čelik s  $DS > 25$  ima umjerenu otpornost na rupičastu koroziju, a čelik s  $DS > 35$  veliku otpornost. Otpornost čelika povisuje se legiranjem Mo i uz povišen %Cr (oko 30 %) kod feritnih čelika, povišenjem pH-vrijednosti na 10 i sniženjem temperature medija. Kako bi se smanjila opasnost od pojave ovog oblika korozije površina se može pasivirati u 10..12 %-tnoj nitratnoj ( $HNO_3$ ) kiselini ili se može primijeniti katodna zaštita [1], [3].

- *Kontaktna korozija* nastupa zbog razlike elektropotencijala dvaju metala u dodiru, a ta vrijednost ovisi o vrsti materijala i vrsti agresivnog medija. Ukoliko se dva različita metala u

dodiru nalaze u agresivnom mediju (elektrolitu) doći će do stvaranja galvanskog članka. Više će korodirati metal koji se ponaša kao anoda. Stupanj plemenitosti metala se mijenja u ovisnosti o karakteristikama medija. Kontaktna korozija može se usporiti ili spriječiti katodnom zaštitom, izbjegavanjem spojeva metala različitih potencijala, izoliranjem elemenata u spoju, dodavanjem inhibitora u elektrolit i sl [1], [3].

- *Interkristalna korozija* je posebno opasan oblik korozije jer napreduje nevidljivo duž granica zrna. To dovodi do razaranja metalne veze između kristalnih zrna u mikrostrukturi čelika, a na kraju i do raspada cijelog materijala. Tijekom interkristalne korozije po granicama zrna se izlučuju nečistoće i različiti spojevi legiranih elemenata (npr. karbidi ili oksidi). Ti spojevi imaju različiti potencijal u odnosu na okolna zrna (čvrstu otopinu). Ovom tipu korozije podložni su i inače korozijski postojani, austenitni Cr-Ni čelici i feritni Cr-čelici, dok martenzitni čelici nisu. [3]

Ukoliko se austenitni Cr-Ni čelik dulje vrijeme drži na temperaturi od 550...800 °C dolazi do tzv. senzibilizacije austenita. Senzibilizacijom austenita dolazi do stvaranja uvjeta za formiranje  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  karbida po granicama austenitnih zrna. To se često događa pri zavarivanju. Ukoliko je udio ugljika previsok i brzina hlađenja premala dolazi do stvaranja i izlučivanja Cr-karbida. Stvaranjem i izlučivanjem Cr-karbida nastaju područja uz granice zrna s manjim udjelom kroma te zbog toga više ne ispunjavaju nužne uvjete postojanosti na koroziju. Ukoliko tada dođe do kontakta površine s kiselinama ili njezinim otopinama (npr. nitratna, kloridna, mliječna, fluoridna i sl.) čelik će korodirati po granicama austenitnih zrna. Interkristalna korozija iznimno je opasna kod cijevi kroz koje struji agresivni medij jer razaranje materijala počinje na unutrašnjoj površini i napreduje prema vanjskoj.

Ovaj oblik korozije može se spriječiti na nekoliko načina. Ukoliko je došlo do izlučivanja kromovih karbida po granicama austenitnih zrna, čelik treba žariti na 1050...1150 °C i gasiti u vodi. Pri žarenju se karbidi otapaju, legirni elementi se vraćaju u austenit, a mikrostruktura postaje monofazna i homogena. Na taj način se austenit ponovo stabilizira zbog čega nestaju predispozicije za pojavu interkristalne korozije.

Ukoliko treba spriječiti nastanak predispozicija za ovaj oblik korozije (npr. konstrukcija od austenitnog čelika koja će proći postupak zavarivanja ili konstrukcija na kojoj se ne može provesti gašenje i sl.) bira se tzv. stabilizirani austenitni čelik ili čelik sa što manjim sadržajem ugljika. Stabilizirani austenitni čelici uz 18 %Cr i min 8 %Ni sadrže još i dodatak stabilizirajućih legiranih elemenata: titana, niobija ili tantal. Budući da su Ti, Nb i Ta jači karbidotvorci od Cr, u čeliku će nastati Ti-, Nb- ili Ta-karbidi, a ne opasni  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  koji izaziva smanjenje udjela kroma

uz granice zrna. Karbidi stabilizirajućih elemenata su izrazito sitni i homogeno raspoređeni po cijelom volumenu pa njihovo formiranje ne utječe bitno na korozijsku postojanost čelika. Kod čelika s dovoljno niskim sadržajem ugljika nema opasnosti od interkristalne korozije zbog toga što je za formiranje karbida nužna dovoljna količina ugljika. [3]

- *Napetosna korozija* nastupa kad je konstrukcijski dio istodobno izložen djelovanju vlačnog napreznja i agresivnog medija. Vlačno napreznje može biti narinuto izvana ili prisutno u samom materijalu kao zaostalo napreznje (napetost).

Ovaj oblik korozije najčešće nastupa na hladno deformiranim lokalitetima (koljena cjevovoda, oko zavarenih mjesta i sl.), jer tamo dolazi do stvaranja zaostalih napreznja. Pukotine koje nastaju napreduju okomito na smjer vlačnog napreznja, pri čemu se šire interkristalno ili transkristalno, ne nužno po granicama zrna. Na napetosnu koroziju osjetljivi su nehrđajući austenitni i martenzitni čelici, dok feritni nisu. Napetosna korozija najčešće nastaje u medijima koji sadrže halogenide i kloride alkalijskih i zemnoalkaliskih metala uz povišenu temperaturu i tlak [1].

- *Korozija u procijepu* nastaje kada spoj dvaju dijelova ima premalu zračnost da dođe do obnavljanja dotoka elektrolita i kisika, ali istovremeno ima dovoljnu zračnost da elektrolit uđe u spoj (npr. nedovoljno pritegnuta matica na vijku, spoj zakovice i lima i sl.). Korozija u procijepu je intenzivnija u kloridnim otopinama (npr. morska voda). [1], [3]

S obzirom na to koja vrsta i oblik korozije predstavljaju opasnost, materijal se na razne načine može zaštititi od nepoželjnog trošenja uslijed djelovanja korozije. Kako bi se reducirala šteta uzrokovana djelovanjem korozije nužno je pravovremeno i kvalitetno zaštititi konstrukciju. Tehnologijama zaštite materijala od korozije se bavi posebna tehnička disciplina koja se naziva *površinska zaštita materijala*.

Za zaštitu metala od korozije postoji mnogo različitih načina, kao što su:

- isključivanje uzroka korozije (prisutnost elektrolita, kondenzacije vode, naprezanja, dodir različitih materijala i sl.)
- utjecanje na medij (dodatkom stabilizatora, inhibitora i sl.)
- drugačije konstrukcijsko oblikovanje konstrukcije
- primjena zaštitnih prevlaka (lak, metalne i nemetalne prevlake, anodna oksidacija i sl.)
- primjena katodne ili anodne zaštite (žrtvena anoda ili inertne anode s izvorom struje i sl.)

Uz navedene metode, brzina i utjecaj korozije na materijal može se smanjiti korištenjem materijala koji su korozijski postojani [7].

U tablici 3 prikazani su troškovi ovisno o načinu zaštite od korozije.

**Tablica 3. Troškovi korozije prema metodama zaštite u SAD-u [5]**

Način zaštite	Troškovi
Katodna i anodna zaštita	1.0 milijardi \$
Korozijski inhibitori	1.1 milijardi \$
Zaštitni premazi	108.6 milijardi \$
Koroziski otporne legure	7.7 milijardi \$
<b>Ukupno</b>	<b>118.4 milijardi \$</b>

### 3.3. Atmosferska korozija

Atmosfera se sastoji od zraka koji je jednolika smjesa plinova (oko 80 % dušika i 20 % kisika). Za različito korozijsko ponašanje materijala u različitim sredinama odgovorne su manjinske komponente atmosfere [12]. Manjinske komponente atmosfere koje utječu na nastanak korozije mogu biti staklenički plinovi (npr. ugljikov dioksid, ozon, metan, dušikovi oksidi), soli, vodena para i sl. [13]. Na osnovu manjinskih komponenti, atmosfere se dijele na ruralnu, morsku, urbanu i industrijsku atmosferu [12].

Atmosferska korozija nastaje kao rezultat istovremenog djelovanja vlage i kisika iz zraka, a ukoliko jedan od ta dva faktora nedostaje, atmosferska korozija neće nastupiti. Ukoliko je postignuta kritična razina vlažnosti pri izlaganju metalne površine atmosferskom djelovanju, na toj površini nastaje tanki film elektrolita. Kritični nivo vlažnosti za željezo iznosi 60 %.

Atmosferska korozija se u prisutnosti tankog filma elektrolita odvija u ravnoteži anodnih i katodnih reakcija. Anodna reakcija je reakcija oksidacije, pojednostavljeno prikazana jednažbom (3.4), koja za posljedicu ima otapanje metala.

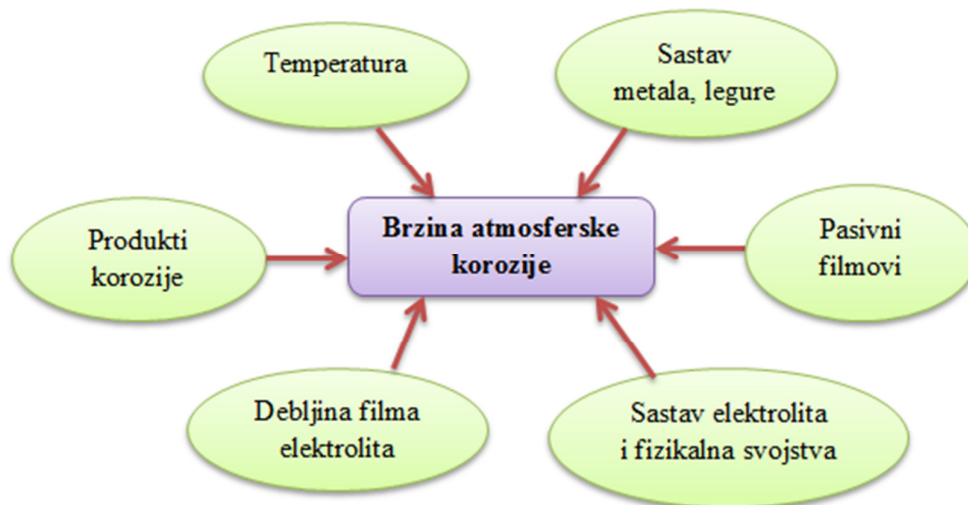


Na ukupnu brzinu anodnog otapanja metala utječe stvaranje korozijskog produkta, topljivost korozijskih produkata u površinskom elektrolitu i stvaranje pasivnog filma.

Katodna reakcija je redukcija kisika. Kod atmosferske korozije u približno neutralnoj okolini dolazi do sljedeće katodne reakcije redukcije kisika: [14]



Faktori koji utječu na brzinu atmosferske korozije prikazani su na slici 3.



Slika 3. Faktori koji utječu na brzinu atmosferske korozije [14]

## 4. CORTEN ČELIK

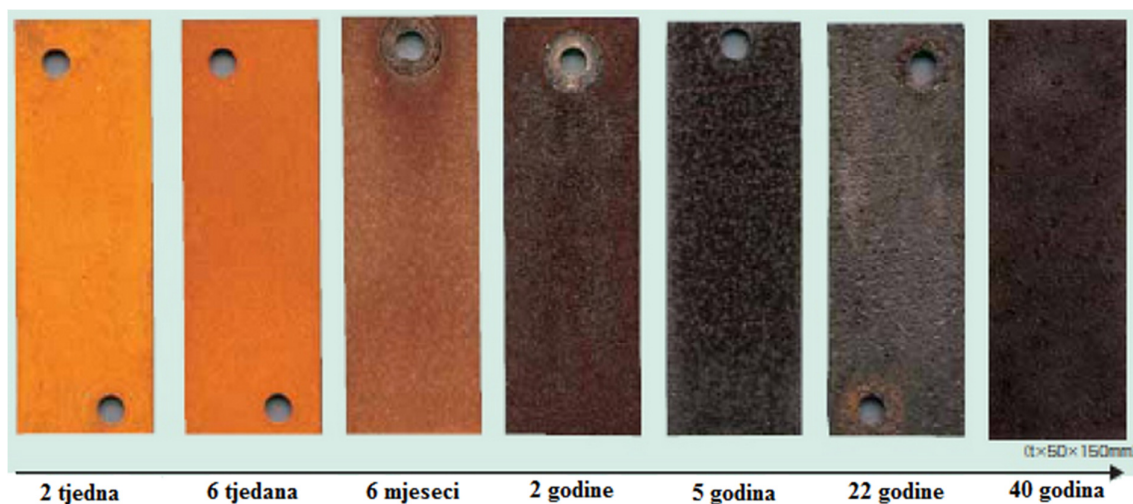
Corten čelik je trgovački naziv za grupu niskolegiranih konstrukcijskih čelika koji imaju povišenu otpornost na djelovanje atmosferske korozije. Kod ovih čelika udio ugljika nije veći od 0,2 %C i udio legiranih elemenata nije veći od 5 %. Ova vrsta čelika razvijena je iz razloga da se smanji potreba za bojanjem, te se najčešće koristi u arhitekturi za unutarnje i vanjske obloge (npr. zamjena za fasadu) i u umjetnosti za izradu umjetničkih djela. Kako bi se postigla željena svojstva, ovaj čelik se legira s legirnim elementima: bakrom (Cu), kromom (Cr) i niklom (Ni).

Corten čelik nije korozijski postojan, već on pri izloženosti atmosferskim uvjetima kao produkt korozije stvara površinski oksidni sloj koji štiti osnovni materijal od daljnjeg prodiranja korozije. Oksidni sloj nastaje zbog prisustva legiranih elemenata u sastavu čelika, pogotovo bakra. [15]

U normalnim atmosferskim uvjetima stvaranje površinskog oksidnog sloja traje od 18 do 36 mjeseci [16]. Na brzinu stvaranja sloja najviše utječe koncentracija vlage, ugljikovog dioksida ( $\text{CO}_2$ ), sumporovog dioksida ( $\text{SO}_2$ ) i morske vode u atmosferi u kojoj se čelik nalazi [17]. Stvoreni oksidni sloj naziva se patina. Tijekom tog perioda Corten čelik doživljava postupnu promjenu boje. Ta promjena je najizraženija u prve 2 godine.

Corten čelik već nakon samo dva tjedna izloženosti normalnim atmosferskim uvjetima poprima prljavo žutu boju. Oko 6 tjedana nakon izlaganja Corten čelika djelovanju atmosfere on poprima narančastu boju. Nakon 6 mjeseci boja je svijetlo smeđa, te dvije godine od postavljanja Corten čelik poprima tamno smeđu boju. Nakon što se postigne tamno smeđa boja ona se tijekom godina ne mijenja značajno, te može postati samo tamnija. Promjene boje tijekom vremena prikazane su na slici 4, gdje se vidi postupna promjena boje kroz 40 godina. [18]





**Slika 4. Stvaranje zaštitnog korozijskog sloja i promjena boje tijekom godina [18]**

Corten naziv dolazi kao spoj dva najvažnija svojstva ovog čelika, a to su otpornost na atmosfersku koroziju (COR - *corrosion resistance*) i vlačna čvrstoća (TEN - *tenssile strenght*).

Zbog površinskog oksidnog sloja korozijska postojanost ovih čelika puno je bolja od korozijske postojanosti nekih drugih konstrukcijskih čelika. Zbog zanimljivog estetskog izgleda i dobre otpornosti na atmosfersku koroziju on je veoma zanimljiv građevinarima, arhitektima i umjetnicima za izradu njihovih projekata. [16]

Neke od prednosti Corten čelika su: jednostavno održavanje konstrukcije, niski troškovi održavanja konstrukcije, nema štetnih zaštitnih premaza i boja, zanimljiv estetski izgled, manje opasnih poslova za radnike pri održavanju jer nije potrebno čišćenje i bojanje konstrukcije, jednostavnije inspekcije i dr. Ukoliko se Corten čelik ne postavi pravilno može doći do curenja površinskog sloja na druge dijelove konstrukcije tijekom početnog korodiranja, a ukoliko se koristi u atmosferama s puno soli može doći do nekontrolirane korozije. [19]

#### 4.1. Vrste Corten čelika

Ovisno o kemijskom sastavu i mehaničkim svojstvima Corten čelik se po ASTM standardu dijeli na dvije vrste: Corten-A i Corten-B čelik.

##### - Corten-A čelik:

Corten-A čelik (ASTM standard) ima granicu razvlačenja  $R_e = 355 \text{ N/mm}^2$ , i vlačnu čvrstoću  $R_m = 470-630 \text{ N/mm}^2$ . Uz bakar, krom i nikal u kemijskom sastavu, Corten-A čelik ima više fosfora od Corten-B čelika te je zbog toga pogodan za korištenje u atmosferama gdje je povišeni sadržaj ispušnih plinova. Ovaj čelik nije preporučljivo koristiti za konstrukcije koje su pod velikim opterećenjem već se on primjenjuje kao vanjska obloga na građevinama ili pri izradi poljoprivrednih vozila, željezničkih vagona, kontejnera, dimnjaka i sl. Također se koristi i za izradu umjetničkih skulptura [20].

Kemijski sastav Corten-A čelika prikazan je u tablici 4.

**Tablica 4. Kemijski sastav Corten-A čelika**

Element	C	Cu	Cr	Ni	Si	Mn	P	S
%	max. 0.12	0.25- 0.55	0.50- 1.25	max. 0.65	0.25- 0.75	0.25- 0.50	0.07- 0.15	max. 0.030

Mehanička svojstva Corten-A čelika debljine veće od 3 mm na sobnoj temperaturi prikazana su u tablici 5.

**Tablica 5. Mehanička svojstva Corten-A čelika pri sobnoj temperaturi**

Debljina, b [mm]	$R_e$ , [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ , [N/mm <sup>2</sup> ]	A, %
≥ 3	min. 355	470-630	min. 20

##### - Corten-B čelik:

Corten-B čelik (ASTM standard) je vruće valjani konstrukcijski čelik. Ovisno o debljini ovaj čelik ima granicu razvlačenja  $R_e = 345-355 \text{ N/mm}^2$ , vlačnu čvrstoću  $R_m = 470-630 \text{ N/mm}^2$  i istezljivost  $A = \text{min. } 20 \%$ . Corten-B čelik je pogodan za različite vrste zavara i za konstrukcije koje se spajaju vidama ili zakovicama kao što su čelični konstrukcijski okviri, obloge zgrada,

umjetničke skulpture, dimnjaci, ispušni sustavi, mostovi i dr. Za razliku od Corten-A čelika, ovaj je čelik pogodan za korištenje kod konstrukcija s većim opterećenjem [21].

Kemijski sastav Corten-B čelika prikazan je u tablici 6.

**Tablica 6. Kemijski sastav Corten-B čelika**

Element	C	Cu	Cr	Ni	Si	Mn	P	S	V
%	max.	0.25-	0.40-	max.	0.30-	0.80-	max.	max.	0.02-
	0.16	0.40	0.65	0.40	0.50	1.25	0.03	0.03	0.10

Mehanička svojstva mogu varirati s obzirom na debljinu čelika te su ona prikazana u tablici 7.

**Tablica 7. Mehanička svojstva Corten-B čelika**

Debljina, b [mm]	$R_e$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	A [%]
$\leq 16$	min. 355	470-630	min. 20
$16 < b \leq 50$	min. 345	470-630	min. 20

## 4.2. Zavarivanje Corten čelika

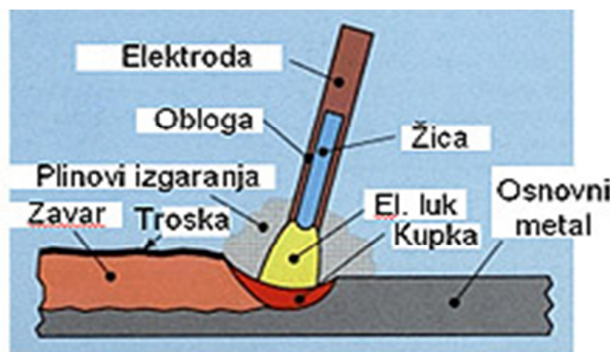
Čelici koji imaju povišenu otpornost na atmosfersku koroziju, prema normi EN 1090-2:2011 mogu se zavarivati slijedećim postupcima [22]:

- Ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom – REL (MMA i SMAW)
- MAG postupak zavarivanja
- Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška (EPP)

### - Ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom – REL

REL postupak zavarivanja je najčešće korišteni postupak zavarivanja. Ovaj postupak je ručni što znači da je potreban zavarivač. Elektručni luk kod REL postupka uspostavlja se kratkim spojem između obložene elektrode za zavarivanje i radnog komada koji je priključen na polove električne struje. Obloga elektrode štiti zavar od oksidacije i zagađenja stvaranjem ugljikovog dioksida ( $\text{CO}_2$ ), služi kao dodatni materijal za stvaranje zavara, te utječe na stabilnost električnog luka [23]. Obloge kod REL zavarivanja mogu biti bazične, rutilne, kisele i celulozne. [24]

REL postupak zavarivanja ima veoma široko područje primjene, te se može koristiti za zavarivanje većine metalnih materijala svih debljina uz odabir odgovarajuće elektrode (za sve konstrukcijske čelike, Cu, Ni, Ti...) [23]. Ovim postupkom moguće je zavarivanje u svim položajima, u radionici i na terenu, te je oprema jednostavna i jeftina. Na slici 5 prikazan je REL postupak zavarivanja. [25]



Slika 5. REL postupak zavarivanja [24]

Zbog potrebe za čestim promjenama elektroda i čišćenja troske brzina zavarivanja kod REL postupka je relativno mala, te se ovaj postupak najčešće koristi kod kraćih zavara debljine do 20

mm. Kvaliteta zavora veoma ovisi o sposobnosti zavarivača, prilikom zavarivanja dolazi do štrcanja, te je loša iskoristivost dodatnog materijala pri čemu se mogu javiti gubici i do 30 %. Ovaj postupak nije moguće automatizirati. [25]

Parametri koji su važni kod REL postupka zavarivanja su: [26]

- napon struje (U) – 18 – 26 V
- jakost struje (I) –  $40 \cdot \varphi$  elektrode ( $\varphi$  – promjer elektrode)
- brzina zavarivanja (v) – 1.5 - 2.5 mm/s (ovisi o promjeru elektrode, tehnici zavarivanja i parametrima zavarivanja)

Greške koje se mogu pojaviti kod ovog postupka zavarivanja su: poroznost (nepravilna tehnika rada, neodgovarajuća duljina el. luka, nepravilno prekidanje i nastavljanje zavora...), nedovoljna penetracija i naljepljivanje (prebrzo vođenje elektrode, premala stduje, puhanje el. luka...), uključci troske (loše čišćenje između slojeva, nepravilno i prejako njihanje elektrode) i loša geometrija zavora (nepravilna tehnika zavarivanja i loši parametri) [25].

### **- MAG postupak zavarivanja**

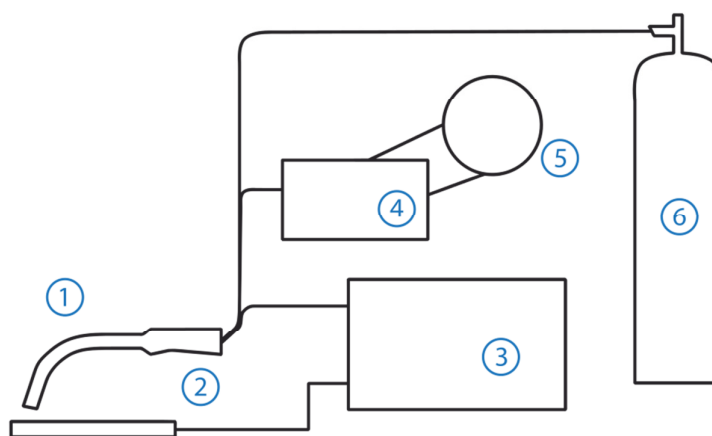
MAG postupak je postupak elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom u atmosferi aktivnog plina. Ovaj postupak može biti poluautomatski, mehanizirani i automatski. Kod poluautomatskog postupka plamenik se vodi ručno, kod mehaniziranog postupka plamenik se vodi pomoću kolica, a kod automatskog postupka plamenik se pomiče automatski [27].

Kao aktivni plin najčešće se koristi ugljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ) ili mješavina plinova: ugljični dioksid + argon ( $\text{CO}_2 + \text{Ar}$ ) ili ugljikov dioksid + argon + kisik ( $\text{CO}_2 + \text{Ar} + \text{O}_2$ ). Aktivni plin ( $\text{CO}_2$ ) ili smjesa plinova štiti zavar tijekom zavarivanja od atmosferskih i drugih utjecaja koji mogu loše utjecati na zavar. Onda kada je potrebno dobiti lijep izgled zavora i dobru zavarljivost koristi se mješavina plinova koja se sastoji od približno 80 %Ar i 20 % $\text{CO}_2$  [28].

U ovom postupku kao elektroda za zavarivanje se koristi gola žica, koja se kontinuirano dovodi u pištolj za zavarivanje i služi kao dodatni materijal. Materijal elektrode je najčešće isti ili sličan kao i materijal koji se zavaruje [27].

Oprema koja se koristi kod MAG postupka zavarivanja prikazana je na slici 6, a sastoji se od [28]:

1. pištolja za zavarivanje
2. radnog komada
3. izvora struje za zavarivanje
4. uređaja za dobavu taljive žice
5. koluta sa žicom
6. boce sa zaštitnim plinom



**Slika 6. Oprema za MAG postupak zavarivanja [28]**

Postupak zavarivanja počinje uspostavljanjem električnog luka, kratkim spojem između žice i radnog komada. Kako bi došlo do kratkog spoja radni komad mora biti priključen na polove struje (istosmjerne). Nakon što se uspostavi električni luk u njega se ravnomjerno dovodi žica za zavarivanje. Žica i osnovni materijal se tale te pritom nastaje zavareni spoj. Za ravnomjerno dovođenje žice u električni luk koristi se elektromotor ili valjci za ravnanje i povlačenje ili potiskivanje žice. [26]

Parametri koji su najvažniji kod MAG postupka zavarivanja su: [26]

- napon zavarivanja ( $U$ ) – prilikom zavarivanja obično iznosi 16 do 26 V
- jakost struje zavarivanja ( $I$ ) – ovisi o promjeru žice, a iznosi 80 do 180 A
- brzina zavarivanja ( $v$ ) – ovisi o primjenjenoj tehnici zavarivanja (lijevo ili desno), promjeru žice za zavarivanje i parametrima zavarivanja, a iznosi 2 do 4 mm/s

MAG postupak zavarivanja može se koristiti za zavarivanje većine metalnih materijala, a obično se primjenjuje za zavarivanje cijevi i lomova debljine 1 do 20 mm. Ovim postupkom može se

zavarivati u radioni i na terenu u svim položajima te se postiže velika proizvodnost i učinkovitost, te se dobiva kvalitetan zavar s dobrim mehaničkim svojstvima. Neki od nedostataka su ti da mogu nastati problemi s dovođenjem žice, može doći do naljepljivanja i poroznosti zbog loših parametara zavarivanja ili loše tehnike rada, te prilikom zavarivanja na terenu vjetar može stvarati probleme [29]. Budući da se oslobađaju plinovi prilikom zavarivanja, prostor u kojem se zavaruje treba imati dobru ventilaciju. U odnosu na REL postupak zavarivanja, MAG postupkom se može položiti više materijala po satu, nema potrebe za čestim mijenjanjem elektroda, te se dobiva čišći zavar [26].

### **- Elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška – EPP**

EPP je postupak elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom pod zaštitom praška. Ovaj postupak je automatski, te se zavarivanje provodi u horizontalnom položaju taljivom elektrodom koja služi kao dodatni materijal. Elektroda može biti u obliku žice (ili više žica) i u obliku trake (ili više traka). Prašak i elektroda izabiru se zajednički ovisno o vrsti materijala koji se zavaruje.

Kod EPP postupka električni luk se uspostavlja pomoću visokofrekventnog generatora koji se uključuje samo u djeliću sekunde neposredno prije zavarivanja, te se isključuje nakon uspostavljanja električnog luka. Tijekom zavarivanja elektroda za zavarivanje kontinuirano dolazi u električni luk, gdje se tali i sudjeluje u stvaranju zavarenog spoja. [26]

EPP postupkom zavarivanja postižu se velike brzine zavarivanja i puno veća produktivnost u odnosu na REL i MAG postupak. Kvaliteta zavara ne ovisi o zavarivaču, te se postiže kontinuirana kvaliteta zavarenih spojeva. Budući da je postupak automatiziran puno je lakše i brže provesti obuku za operatera koji rukuje sa strojem nego obuku zavarivača za zavarivanje REL postupkom. EPP postupkom postiže se kvalitetan estetski izgled zavara, troska se lako čisti, te budući da se električni luk nalazi ispod praška nema prskanja kapljica u okolinu i dima. [30]

Parametri važni kod EPP postupka zavarivanja su: [26]

- napon zavarivanja (U) – 26 – 40 V
- jakost struje (I) – 100 – 1000 A ovisno o promjeru elektrode
- brzina zavarivanja – 200-600 mm/min

Oprema za EPP postupak zavarivanja je skupa, te se postižu lošija mehanička svojstva zavara u odnosu na REL i MAG postupak zbog brzog hlađenja položenog materijala. Tijekom zavarivanja

električni luk nije moguće promatrati osim uz nadzor rendgenskim zrakama ili video kamerama, a zavarivati se može samo u horizontalnom ili blago nagnutom položaju.

Ovim postupkom zavarivanja mogu se zavarivati nelegirani čelici, niskolegirani čelici, visokolegirani čelici, te se koristi kod zavarivanja mostova, velikih cijevi cijevovoda, u brodogradnji za zavarivanje raznih ojačanja i dr. Najčešće se koristi za zavarivanje limova debljine 4 – 30 mm. [26]

### 4.3. Primjena Corten čelika

1933. godine United States Steel Corporation (USS) je patentirala Corten čelik, te je njegova prva primjena bila za izradu vagona za prijevoz ugljena. [31]

30 godina nakon što je patentiran, zbog otpornosti na atmosfersku koroziju, niskih troškova održavanja, te zbog zanimljivog vizualnog izgleda Corten čelik se 1963. godine prvi put koristi u arhitekturi. Prva zgrada gdje se koristio ovaj čelik je sjedište tvrtke Deere & Company u Moline, Illinois, Sjedinjene Američke Države, koja je prikazana na slici 7. [32]



**Slika 7. Primjena Corten čelika [33]**

Od tada do danas ovaj čelik je našao primjenu u mnogim svjetskim poznatim građevinama, kao što su Barclays Center u Brooklyn-u (SAD), Broadcasting Tower u Leeds-u (UK), Muzej nove i stare umjetnosti (MONA) u Hobart-u (Australija) i dr. [32], [34] .

Neke od tih građevina prikazane su na slici 8.





**Slika 8. Barclays Center (lijevo) i Broadcasting Tower u Leeds-u (desno) [35], [36]**

Corten čelik donosi velike uštede kada je u pitanju održavanje konstrukcije. Budući da sloj patine štiti materijal od daljnjeg prodiranja korozije troškovi održavanja konstrukcija izrađenih od ovog čelika su mnogo manji u odnosu na neke druge čelike koji se primjenjuju u tu svrhu (oko 30 % manji troškovi). Upravo zbog toga Corten čelik se veoma često koristi i pri gradnji mostova. Na slici 9 je prikazan most Gorge na rijeci Kanawaha (Zapadna Virginia, SAD). [37]



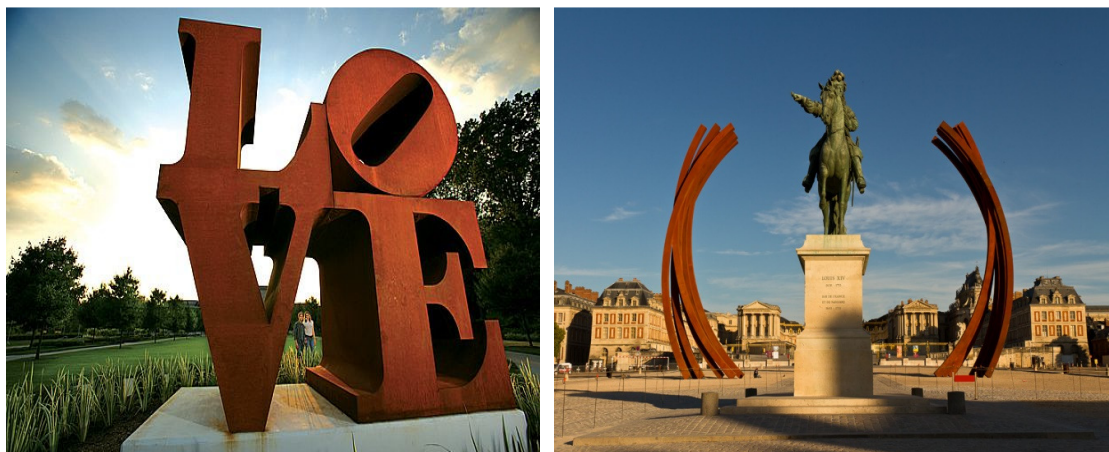
**Slika 9. Most George na rijeci Kanawaha (Zapadna Virginia, SAD) [37]**

Osim građevinara i arhitekata, Corten čelik veoma često koriste i umjetnici za izradu modernih umjetničkih djela. Neki od umjetnika koji su koristili ovaj čelik za izradu svojih skulptura su

Pablo Picasso (Slika 10. lijevo), Antony Gormley (Slika 10. desno), Robert Indiana (Slika 11. lijevo), Richard Serra (Slika 11. desno) i mnogi drugi. [39]



**Slika 10. P.Picasso - The Chicago Picasso (lijevo), A.Gormley - Angel of North (desno) [40], [41]**



**Slika 11. R.Indiana - Love (lijevo), R.Serra - Lukovi (desno) [42], [43]**

Kada se koristi pravilno, Corten čelik se uklapa i nadopunjuje prirodno okruženje u kojem se nalazi. Boje koje se mijenjaju s vremenom postaju još zanimljivije kada tokom eksploatacije kiša i sunce stvore svjetlije i tamnije tragove i linije na površini materijala. Corten čelik je najpogodniji za uporabu u urbanim i ruralnim područjima, dok u morskim područjima gdje je viši udio soli u atmosferi, sol može spriječiti stabilizaciju čelika te omogućiti prodor korozije u materijal. Corten čelik se ne premazuje zaštitnim premazima zato jer bi to spriječilo njegov prirodni proces stvaranja zaštitnog sloja patine. Izuzetci mogu biti mjesta na kojima voda ne

otječe odmah nego se može zadržati neko vrijeme što može dovesti do rane korozije, pa se ta mjesta onda dodatno premazuju zaštitnim premazima. Tijekom početnog korodiranja može doći do ispiranja površinskog sloja koji može obojati susjedne dijelove konstrukcije, posebno porozne materijale (npr. beton). Kako bi se to spriječilo, najbolje je postaviti Corten čelik tako da voda s njega otječe prema nevidljivim dijelovima građevine ili u odvodne kanale. [19]

#### 4.4. Čelik S355J0WP

Prema normi EN 10025-5:2004 čelik S355J0WP (No. 1.8945) spada u grupu niskolegiranih konstrukcijskih čelika s povišenom otpornosti na atmosfersku koroziju [44]. Kemijski sastav i mehanička svojstva ovog čelika definirani su normom EN 10025-5:2004 te su prikazani u tablici 8 i tablici 9.

**Tablica 8. Kemijski sastav čelika S355J0WP po normi EN 10025-5:2004**

Element	C	Cu	Cr	N	Si	Mn	P	S
%	max. 0.12	0.25- 0.55	0.30- 1.25	max. 0.09	max. 0.75	max. 1.0	0.06- 0.15	max. 0.35

**Tablica 9. Mehanička svojstva čelika S355J0WP po normi EN 10025-5:2004**

Debljina, b [mm]	$R_e$ , [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ , [N/mm <sup>2</sup> ]	KV, [J]	A, [%]
$\leq 3$	min. 355	510-680	27	min. 16
$3 < b \leq 16$	min. 355	470-630	27	min. 22
$16 < b \leq 40$	min. 345	470-630	27	min. 22

Ovaj se čelik najčešće koristi pri gradnji mostova i dimnjaka. Također se koristi kao obloga na zgradama ili kućama (unutarnja i vanjska) i za izradu umjetničkih skulptura. Prema kemijskom sastavu i mehaničkim svojstvima čelik S355J0WP (norma EN 10025-5:2004) spada u skupinu Corten-A čelika (ASTM standard). [44]



## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

### 5.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja

U okviru ovog rada napravljena je karakterizacija osnovnog materijala i zavarenog spoja čeličnih ploča od Corten čelika standardne oznake S355J0WP. Također je analiziran oksidni sloj na osnovnom materijalu i u području zavarenog spoja na uzorcima koji su kroz određeno vrijeme bili izloženi djelovanju atmosfere u ruralnom, industrijskom i morskom okruženju.

Karakterizacija čelika uključivala je sljedeće:

- vizualnu usporedbu oksidiranih površina svih uzoraka
- analizu kemijskog sastava osnovnog materijala i metala zavara
- analiza makrostrukture zavarenog spoja
- analizu mikrostrukture osnovnog materijala, metala zavara i zone utjecaja topline
- analizu oksidnog sloja na osnovnom materijalu i u području zavarenog spoja
- mjerenje mikrotvrdoće osnovnog materijala i zavarenog spoja
- statičko vlačno ispitivanje

### 5.2. Materijal za ispitivanje

Sva navedena ispitivanja provedena su na uzorcima izrezanima iz zavarenih čeličnih ploča debljine 20 mm. Čelične ploče od Corten čelika standardne oznake S355J0WP+AR dobivene su vrućim valjanjem i u takvom stanju su isporučene iz čeličane. Dio uzoraka je izrezan iz osnovnog materijala, a dio iz područja zavarenog spoja. Navedeni čelik spada u grupu niskolegiranih konstrukcijskih čelika s povišenom otpornosti na atmosfersku koroziju.

Oznaka materijala: **S355J0WP+AR**

- **S** – konstrukcijski čelik (čelik za strojogradnju)
- **355** – zajamčena min. granica razvlačenja ( $R_e$  min.)
- **J0** – zajamčena udarna radnja loma 27 J pri 0 °C
- **W** – otporan na atmosferilije
- **P** – za žmurje
- **AR** – valjano (bez posebnih uvjeta valjanja i/ili toplinske obrade)

Proizvođač čelika jamči kemijski sastav naveden u tablici 10 i mehanička svojstva navedena u tablici 11. Navedena mehanička svojstva u tablici 11 vrijede pri temperaturi od 20 °C.

**Tablica 10. Kemijski sastav čelika zajamčen od strane proizvođača**

Element	C	Cr	Cu	Ni	Mn	Si	P	S	N	Fe
[%]	≤ 0,12	0,30 – 1,25	0,25 – 0,55	≤ 0,65	≤ 1,0	≤ 0,75	0,06 – 0,15	≤ 0,035	≤ 0,009	ostatak

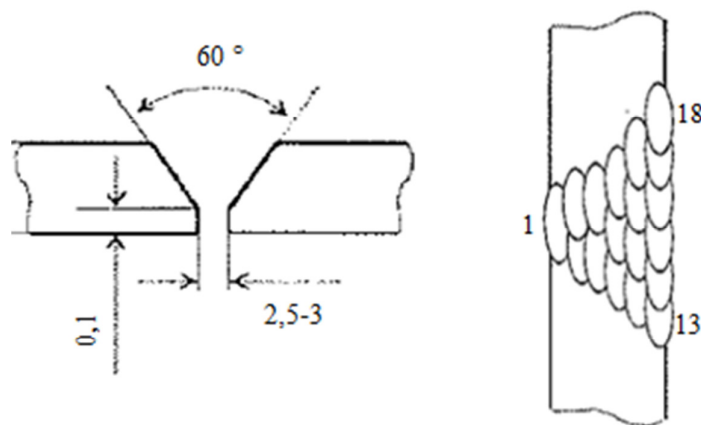
**Tablica 11. Mehanička svojstva osnovnog materijala zajamčena od strane proizvođača**

$R_e$ , [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ , [N/mm <sup>2</sup> ]	$A$ , [%]	KV [J] (pri 0 °C)
min. 355	470 - 630	min. 20	27

Navedeni materijal namijenjen je za izradu čeličnih konstrukcija i kanala pri rekonstrukciji kotlovskog postrojenja TE Plomin 2.

Zavarivanje je izvedeno u Zavodu za zavarivanje, ispitivanje i tehnologiju u Zagrebu (ZIT-u). Ploče su zavarene postupkom ručnog elektrolučnog zavarivanja (REL) prema normi HRN EN ISO 15614-1 u zidnom položaju (PC). Prilikom zavarivanja korišten je dodatni materijal koji nosi trgovački naziv EVB CuNi.

Shematski prikaz pripreme spoja i redoslijed zavarivanja u zidnom položaju prikazan je na slici 12.



**Slika 12. Shematski prikaz pripreme spoja i zavarivanja u PC položaju**

Tablica zavarivanja nalazi se u Prilogu.

Na slikama 13 i 14 prikazana je zavarena ploča iz koje su izrezani uzorci za sva potrebna ispitivanja. Na slici 13 prikazane su zavarene ploče sa strane tjemena zavora, a na slici 14 sa strane korijena zavora.



**Slika 13. Zavarena ploča od čelika S355J0WP – tjemena zavora**



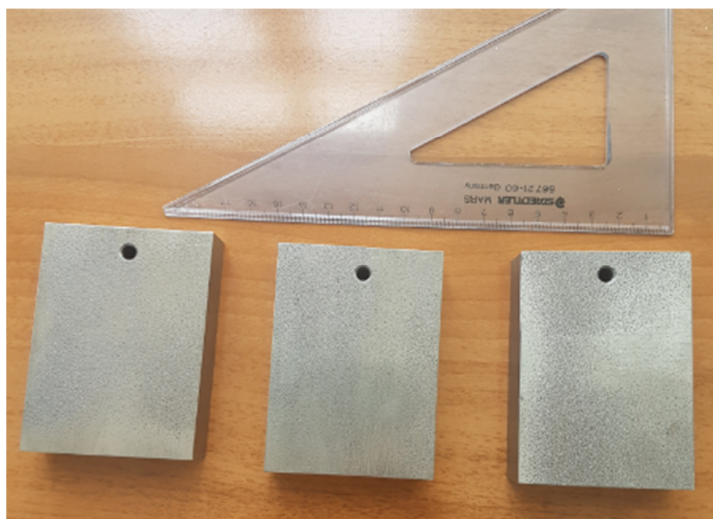
**Slika 14. Zavarena ploča od čelika S355J0WP – korijen zavora**

Ukupno je izrezano šest uzoraka. Tri uzorka su izrezana iz osnovnog materijala, a tri uzorka iz područja zavarenog spoja. Na uzorcima izrezanima iz osnovnog materijala poglodane su sve površine, a na uzorcima sa zavarenim spojem poglodana je površina sa strane tjemena zavara. Na slici 15 prikazani su uzorci izrezani iz osnovnog materijala, a na slikama 16 i 17 uzorci sa zavarenim spojem. Na slici 16 prikazana je tjemena, pogledana strana uzoraka sa zavarenim spojem, a na slici 17 vide se isti uzorci sa strane korijena zavara, na kojima se vidi oksidirana, nepoglodana površina. Na svim uzorcima su probušene rupe potrebne za vješanje uzoraka tijekom izlaganja atmosferskim uvjetima.

U periodu od 25.02. do 12.09.2017. godine (200 dana) uzorci su bili izloženi djelovanju različite atmosfere na tri lokacije u Republici Hrvatskoj:

1. Šemovci, selo u Koprivničko – Križevačkoj županiji - **ruralna atmosfera**
2. grad Zagreb – **industrijska atmosfera**
3. grad Pula – **morska atmosfera**

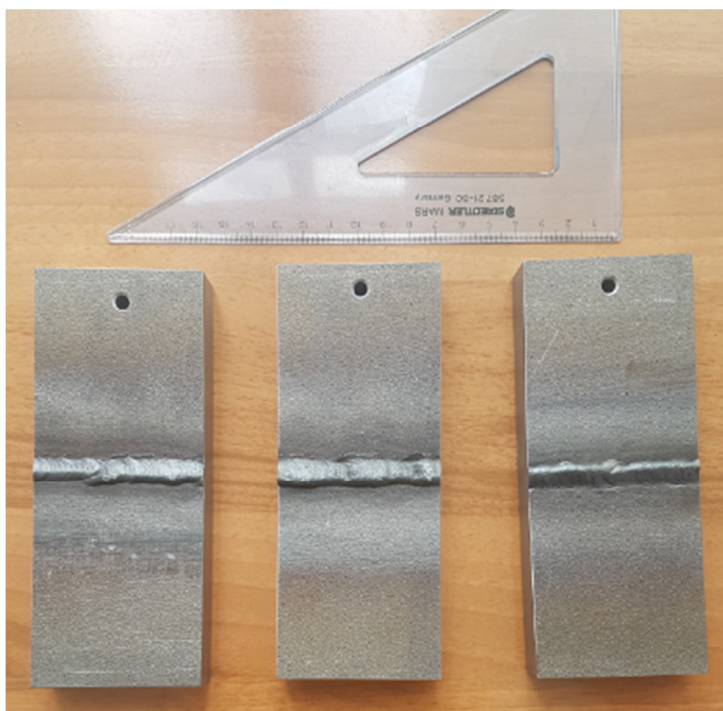
Na svakoj lokaciji bila su izložena po dva uzorka - osnovni materijal i uzorak sa zavarom.



**Slika 15. Uzorci iz osnovnog materijala (bez zavara)**



**Slika 16. Uzorci sa zavarom – tjeme zavora**



**Slika 17. Uzorci sa zavarom – korijen zavora**



### 5.3. Vizualna usporedba površine uzoraka

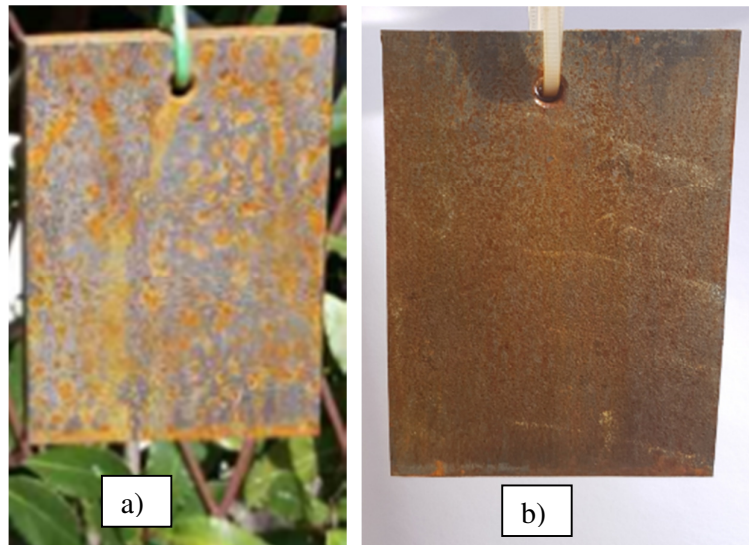
Tijekom izlaganja atmosferi na površini uzoraka vrlo brzo se formirao oksidni sloj. Poznato je da sastav i brzina formiranja sloja ovise o vanjskim utjecajima, prije svega o udjelu vlage i nečistoća u zraku, kao i o temperaturi. S obzirom na različite uvijete koji su vladali na gore navedenim lokacijama, očekivale su se razlike u brzini formiranja i izgledu oksida na površini uzoraka pa su uzorci povremeno fotografirani. Na slikama 18 i 19 prikazan je izgled oksidirane površine uzoraka iz morskog i industrijskog okruženja, nakon 15 dana izlaganja. Već nakon tog, relativno kratkog vremena, vidi se znatna razlika u izgledu površine. Na uzorcima koji su bili izloženi industrijskoj atmosferi oksidi su formirani ravnomjerno, pokrivaju veći dio površine i dosta dobro prijanjaju uz površinu. Na uzorcima koji su bili izloženi morskoj atmosferi formirani oksidi nisu ravnomjerno raspoređeni po površini. Mjestimice je korozija vrlo intenzivna, nastali oksidi se truse s površine i razlikuju se po boji. Nije uočena razlika između osnovnog materijala i područja zavarenog spoja na uzorcima sa zavarom (slika 18 i 19).

Na slikama 20 i 21 prikazani su isti uzorci nakon 40 dana izlaganja. Korozija je uznapredovala na oba uzorka, a razlike u formiranom sloju između uzoraka s različitih lokacija su još jače izražene. Površine uzoraka sa zavarom, sa strane korijena (s izvornom, nepoglodanom površinom), puno su ravnomjernije prekrivene oksidima nego površine koje su poglodane.

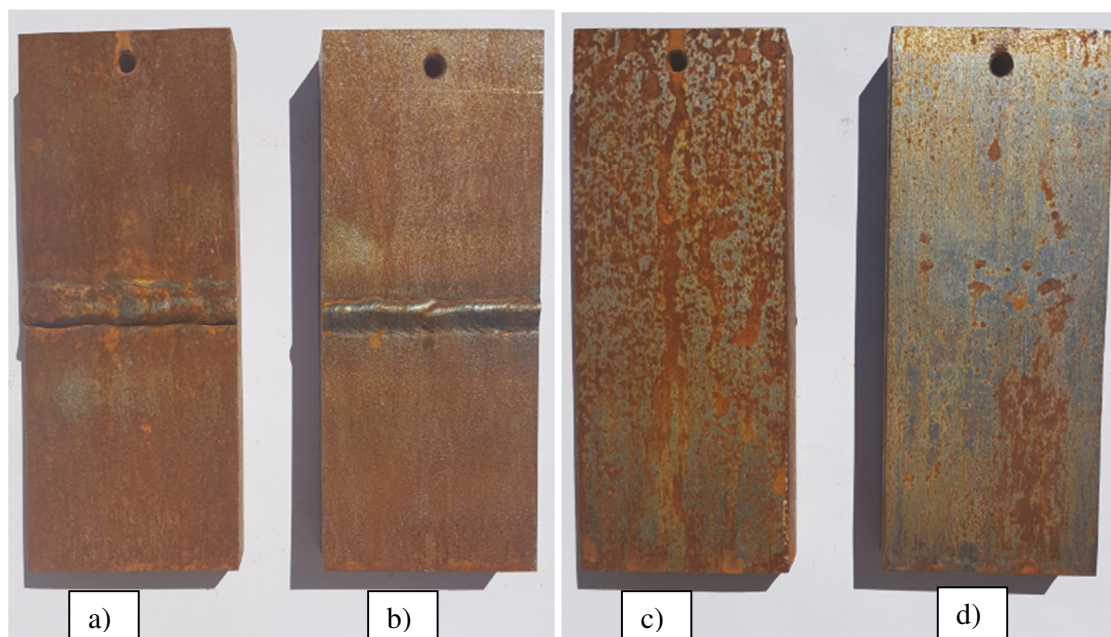
Na slikama 22 i 23 prikazani su uzorci nakon 90 dana izlaganja. Površina uzoraka je gotovo u potpunosti prekrivena produktima korozije. Razlika u boji je izraženija. Kod uzorka sa zavarom koji je bio izložen morskoj atmosferi vidi se uznapredovala korozija na korijenu zavora.



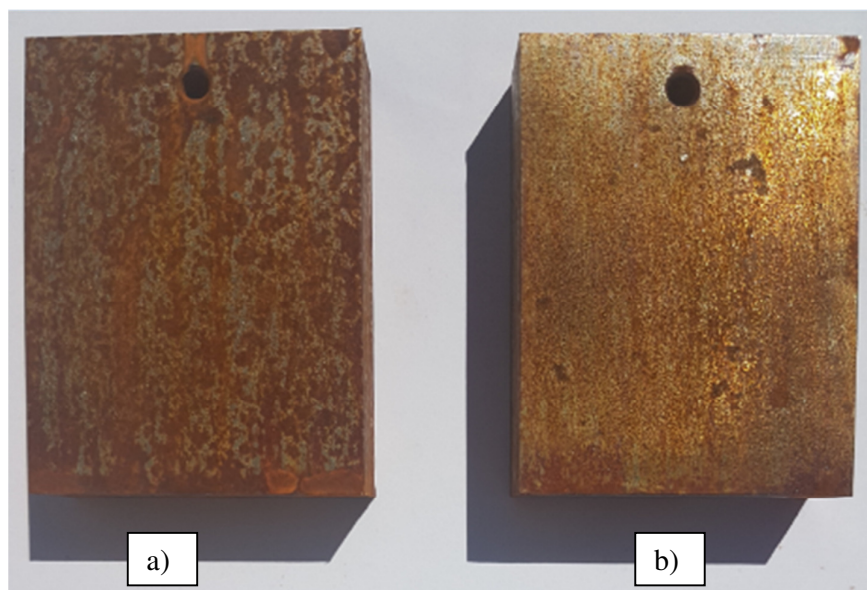
**Slika 18. Uzorci sa zavarenim spojem nakon 15 dana izlaganja djelovanju morske (a) i industrijske (b) atmosfere**



**Slika 19. Osnovni materijal nakon 15 dana izlaganja djelovanju morske (a) i industrijske (b) atmosfere**

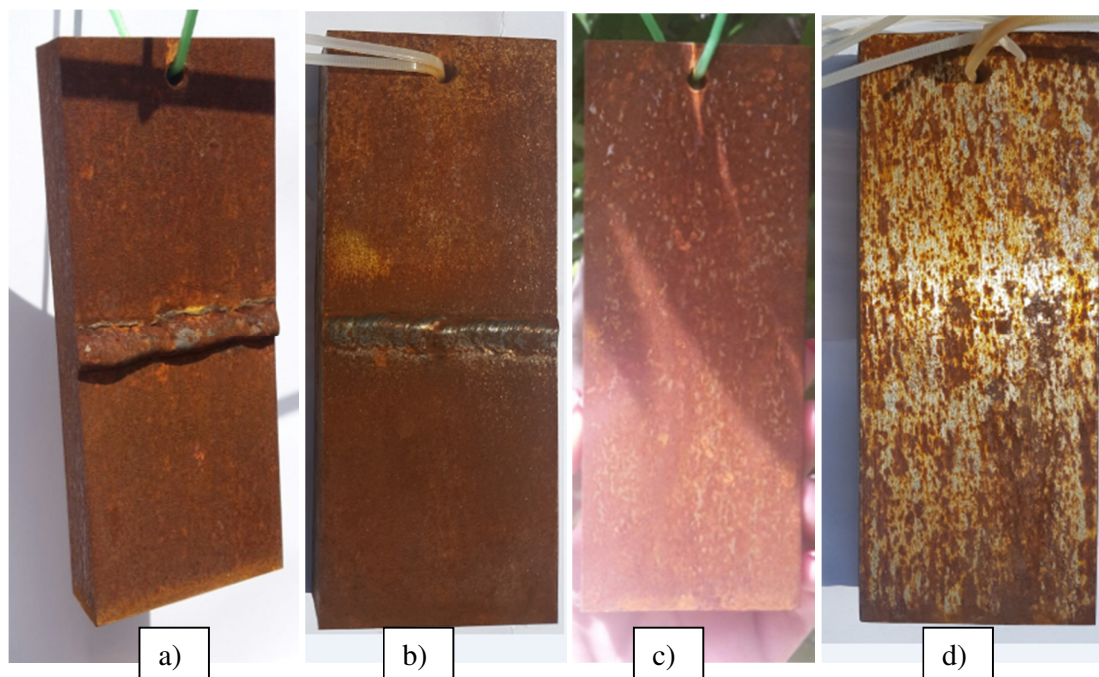


**Slika 20. Uzorci nakon 40 dana izlaganja djelovanju morske (a i c) i industrijske (b i d) atmosfere**

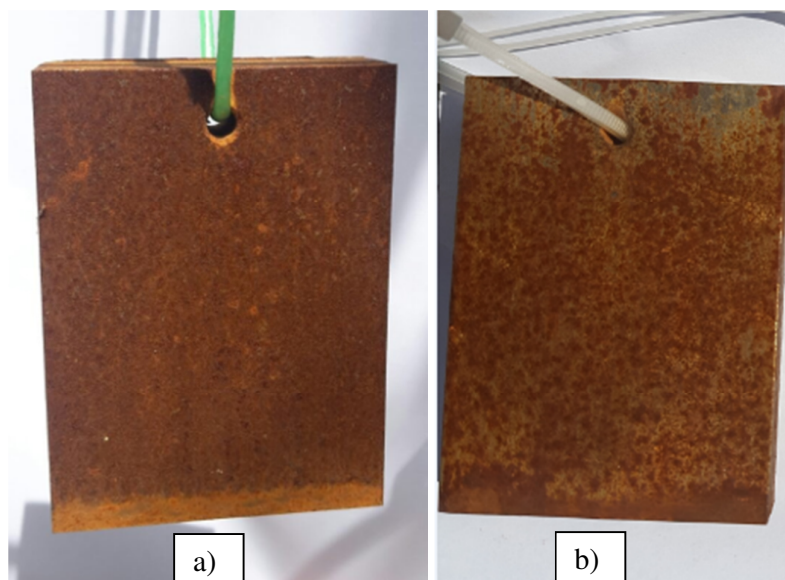


**Slika 21. Osnovni materijal nakon 40 dana izlaganja djelovanju morske (a) i industrijske (b) atmosfere**





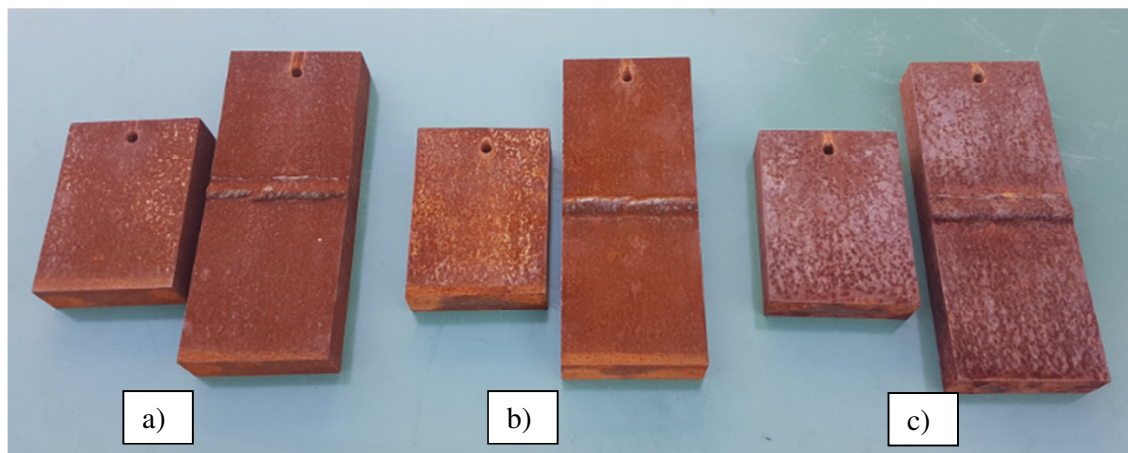
**Slika 22. Uzorci nakon 90 dana izlaganja djelovanju morske (a i c) i industrijske (b i d) atmosfere**



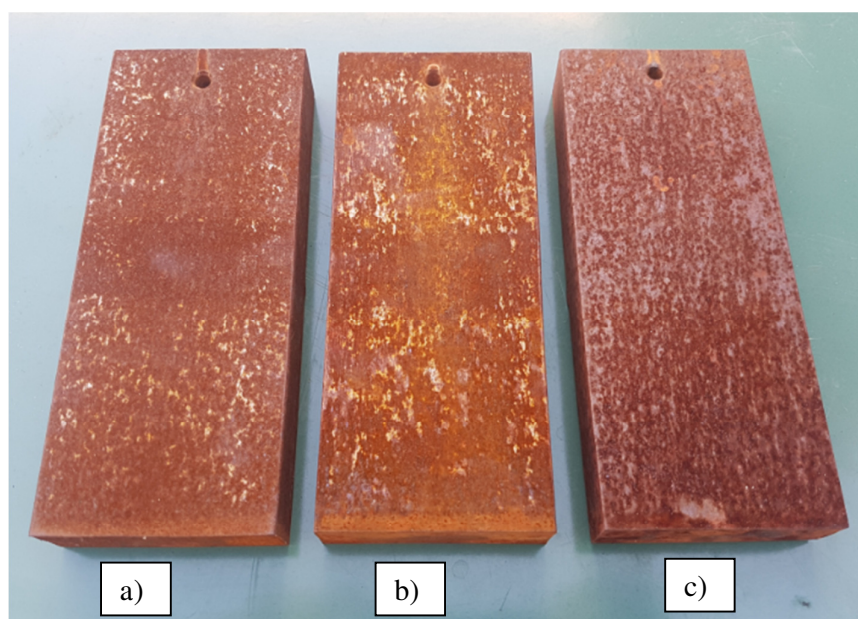
**Slika 23. Osnovni materijal nakon 90 dana izlaganja djelovanju morske (a) i industrijske (b) atmosfere**

Na slici 24 prikazani su svi uzorci nakon 200 dana izlaganja. Razlike u homogenosti i boji nastalih oksidnih slojeva na površinama uzoraka su velike. Uzorci koji su bili izloženi ruralnoj atmosferi imaju najujednačeniju pokrivenost površine oksidima, a uzorci izloženi morskoj atmosferi najviše su oštećeni djelovanjem korozije. Nakon ovog vremena izlaganja može se uočiti razlika u intenzitetu korozije između osnovnog materijala i metala zavara na poglodanoj

površini uzoraka (tjemena strana), slika 25. Sa strane korijena može se uočiti nešto intenzivnija korozija na liniji staljivanja kod svih uzoraka, slika 26. Na slici 27 prikazani su uzorci osnovnog materijala gdje se vidi da korozijski produkti prekrivaju kompletnu površinu. Najjače su korodirali uzorci izloženi morskoj atmosferi i kod njih korozija najdublje ulazi u površinu. Površina uzoraka iz ruralne atmosfere je ravnomjerno prekrivena oksidima, oksidni sloj je tanak i relativno dobro prijanja uz površinu.

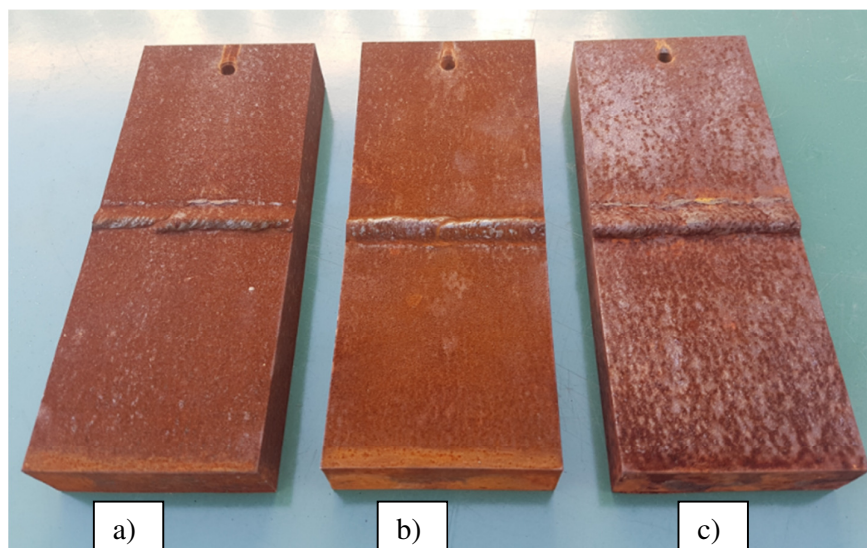


**Slika 24. Uzorci nakon 200 dana izlaganja djelovanju ruralne (a), industrijske (b) i morske (c) atmosfere**

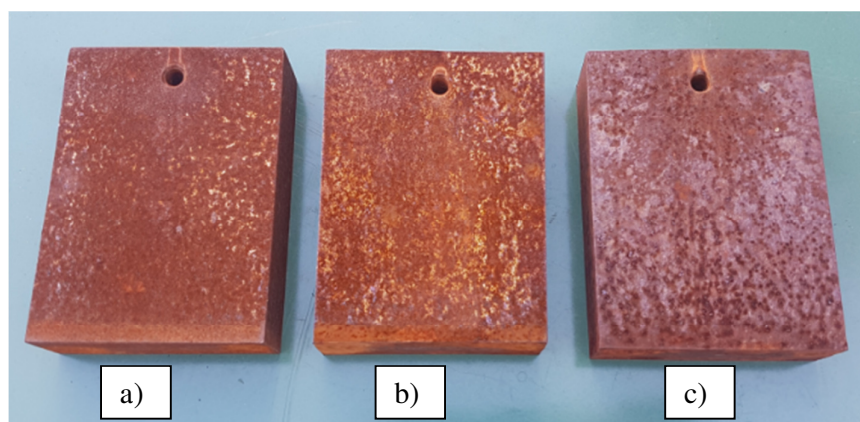


**Slika 25. Uzorci sa zavarom (tjemena strana) nakon 200 dana izlaganja djelovanju ruralne (a), industrijske (b) i morske (c) atmosfere**





**Slika 26. Uzorci sa zavarom (korijenska strana) nakon 200 dana izlaganja djelovanju ruralne (a), industrijske (b), i morske (c) atmosfere**



**Slika 27. Osnovni materijal nakon 200 dana izlaganja djelovanju ruralne (a), industrijske (b) i morske (c) atmosfere**

#### **5.4. Analiza kemijskog sastava**

Analiza kemijskog sastava osnovnog materijala provedena je u Laboratoriju za kemijsku analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Za analizu kemijskog sastava korištena je metoda optičke emisijske spektrometrije s titnjajućim izbojem (GD-OES), na uređaju GDS 850A, Leco. Na tom uređaju provodi se kvalitativna i kvantitativna kemijska analiza vodljivih čvrstih uzoraka. Budući da se spektrografske metode temelje na mjerenju interakcije između elektromagnetskog zračenja i atoma (ili molekula) analita ili na mjerenju zračenja koje emitira

analit, da bi uspješno proveli ispitivanje bilo je potrebno pobuditi atome tinjajućim izbojem odnosno plazmom (ioniziranim plemenitim plinom – argonom).

U tablici 12 prikazani su rezultati analize kemijskog sastava.

Usporedbom dobivenih rezultata s vrijednostima koje garantira proizvođač vidi se velika podudarnost kemijskog sastava. Iako je ovaj čelik iz skupine čelika s nezajamčenim kemijskim sastavom, zbog njegove poboljšane kemijske postojanosti koja se temelji na malim udjelima bakra, kroma i nikla, potrebno je znati udjele tih elemenata. Također treba istaknuti relativno nizak sadržaj ugljika od približno 0,08 % te vrlo nizak udio nečistoća (S i P)

**Tablica 12. Rezultati analize kemijskog sastava čelika S355J0WP**

Element	C	Cr	Cu	Ni	Al	Mn	Si	P	S	Fe
maseni udio, [%]	0,08	0,33	0,27	0,11	0,037	0,8	0,30	0,07	0,004	ostatak

## 5.5. Analiza makrostrukture

Metalografsko ispitivanje zavarenog spoja predstavlja jedan od postupaka kontrole zavarenog spoja. To je razorna metoda ispitivanja kojom se dokazuje kvaliteta izvedenog posla, a izvodi se nakon završnog zavarivanja. Metalografska analiza uključuje makroskopski i mikroskopski pregled zavarenog spoja. Za metalografsku analizu potreban je kvalitetno pripremljen uzorak s ravnom, glatkom i sjajnom površinom. Makroskopska analiza uključuje vizualni pregled bez optičkih pomagala ili s optičkim pomagalima koja imaju sposobnost povećanja do 16 puta (x16). Sve što je vezano uz makroskopsko ispitivanje zavarenih spojeva metalnih materijala propisuje norma HRN EN 1321. Norma propisuje način pripreme uzoraka, postupak ispitivanja i glavni cilj ispitivanja. Makroskopskom analizom otkrivaju se makroskopske značajke zavarenog spoja, najčešće uzetog iz ravnine okomite na smjer zavarivanja.

Neke od značajki koje se vrednuju su:

- tople i hladne pukotine,
- uzdužne pukotine,
- šupljine, pore i uključci,
- nedovoljni provar,
- geometrijski oblik, slojevi i prolazi,

- ZUT (zona utjecaja topline),
- priprema zavara,
- usmjerenost strukture,
- granice zrna, struktura zrna, segregacije, precipitati...

Analiza makrostrukture provedena je na uzorku izrezanom iz zavarene ploče sa slike 13 iz poglavlja 5.2. ovog rada. Uzorak je izrezan tako da se promatra ravnina okomita na smjer zavarivanja. Uzorak je brušen i poliran, a zatim analiziran u poliranom stanju. Nakon toga uzorak je nagrižen u 5 %-tnom nitalu (prema normi HRN CR 12361) i analiziran u nagriženom stanju.

U poliranom stanju na površini uzorka nisu uočene nikakve nepravilnosti.

U nagriženom stanju vidi se oblik samog zavara, jasno je izražena linija staljivanja, a pojednini prolazi nisu jasno izdiferencirani. Nema velike razlike između strukture osnovnog materijala i strukture materijala u području ZUT-a.

Makro-nagriženi uzorak prikazan je na slici 28.

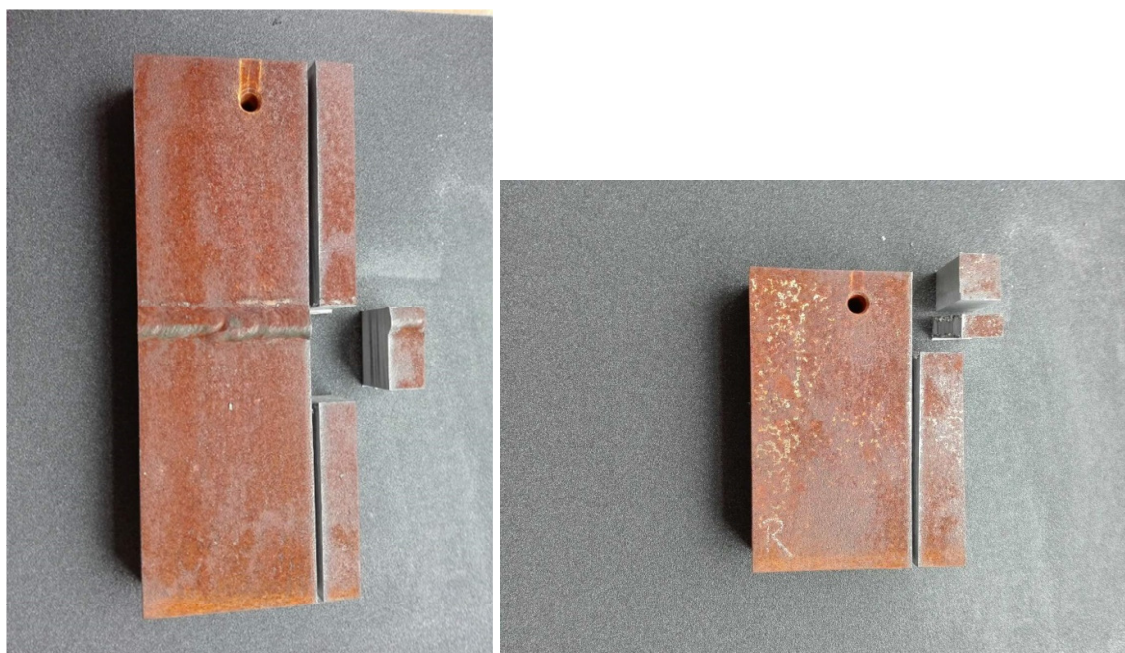


**Slika 28. Uzorak nakon nagrivanja**



## 5.6. Analiza mikrostrukture

Analiza mikrostrukture provedena je u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Iz uzoraka koji su bili izloženi djelovanju atmosfere izrezano je 9 uzoraka za analizu mikrostrukture. Izrezano je 6 uzoraka iz osnovnog materijala (po dva uzorka za svaku lokaciju) i 3 uzorka sa zavarenim spojem. Osnovni materijal analiziran je u smjeru valjanja i smjeru okomitom na smjer valjanja. Mjesto i način uzimanja metalografskih uzoraka prikazani su na slici 29.



**Slika 29. Uzimanje uzoraka za metalografsku analizu**

Izrezani uzorci su zaliveni u polimernu masu, brušeni i polirani te analizirani u poliranom stanju. Nakon toga uzorci su nagriženi i analizirani u nagriženom stanju. Analiza mikrostrukture provedena je na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51 i na pretražnom elektronskom mikroskopu (SEM) Tescan Vega TS5136LS.

### 5.6.1. Priprema metalografskih uzoraka

#### ***Brušenje:***

Postupak brušenja proveden je na uređaju za brušenje uz brzinu okretanja 300 okretaja/min. Brušenje je započeto grubim papirom i postepeno se prelazilo na finije, redosljedom koji je

prikazan u tablici 13. Za vrijeme brušenja uzorak se konstantno hladio vodom. Uzorci su tijekom brušenja pridržavani rukom. Vrijeme brušenja najviše ovisi o stanju površine uzorka te je za svaki uzorak bilo drugačije.

Na slici 30. prikazan su postupak brušenja jednog od uzoraka.

**Tablica 13. Brušenje**

Brusni papir	P320	P600	P1000	P2400	P4000
okretaji/min	300	300	300	300	300



**Slika 30. Brušenje uzoraka**

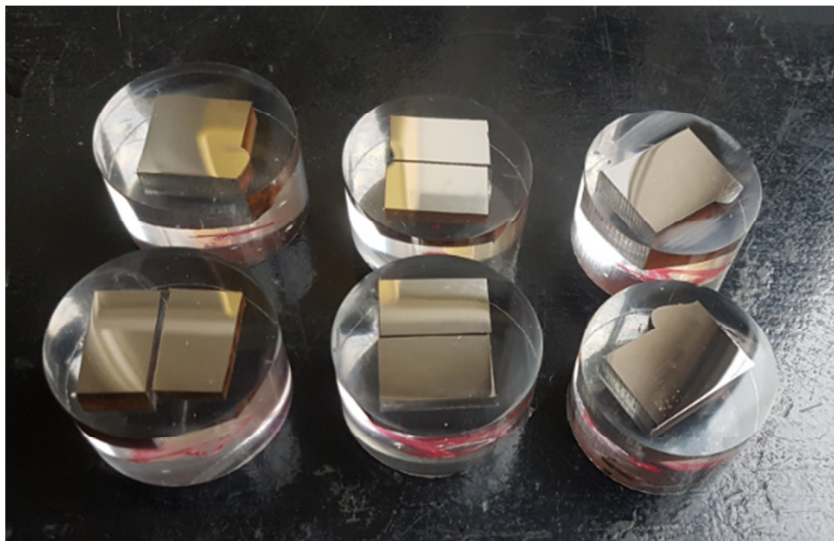
***Poliranje:***

Poliranje slijedi nakon postupka brušenja. Poliranje se provodi na tkanini MD-DAC s dijamantnom pastom. Kao i kod brušenja, poliranje počinje s grubljim abrazivnim česticama, a završava finijim kako je prikazano u tablici 14. Za vrijeme poliranja uzorak se podmazuje lubrikantom (mješavina alkohola i vode), a brzina okretaja je 150 okretaja/min. Svaki stupanj poliranja traje približno 3 minute.

**Tablica 14. Poliranje**

Veličina dijamantsnih čestica	3 $\mu\text{m}$	1 $\mu\text{m}$
Broj okretaja u min	150	150

Pripremljeni metalografski uzorci, spremni za analizu mikrostrukture, prikazani su na slici 31.



**Slika 31. Metalografski uzorci nakon poliranja**

Nakon provedenog poliranja uzorci su se analizirali na svjetlosnom mikroskopu kako bi se vidjelo ima li na površini pukotina, nemetalnih uključaka ili poroziteta. U poliranom stanju snimljeni su i slojevi oksida nastali na površinama uzoraka tijekom izlaganja djelovanju atmosfere.

#### ***Nagrizanje:***

Nakon analize u poliranom stanju površina uzoraka se nagriza. Površina se nagriza kako kako bi se otkrila mikrostruktura - kristalna zrna, njihove granice i ostale karakteristike koje se ne vide u poliranom stanju. Sastav sredstva za nagrizanje određuje se prema kemijskom sastavu čelika. Ispitivani uzorci nagrizeni su u sredstvu koje ima sljedeći sastav:

- 97 ml etilnog alkohola
- 3 ml dušične kiseline.

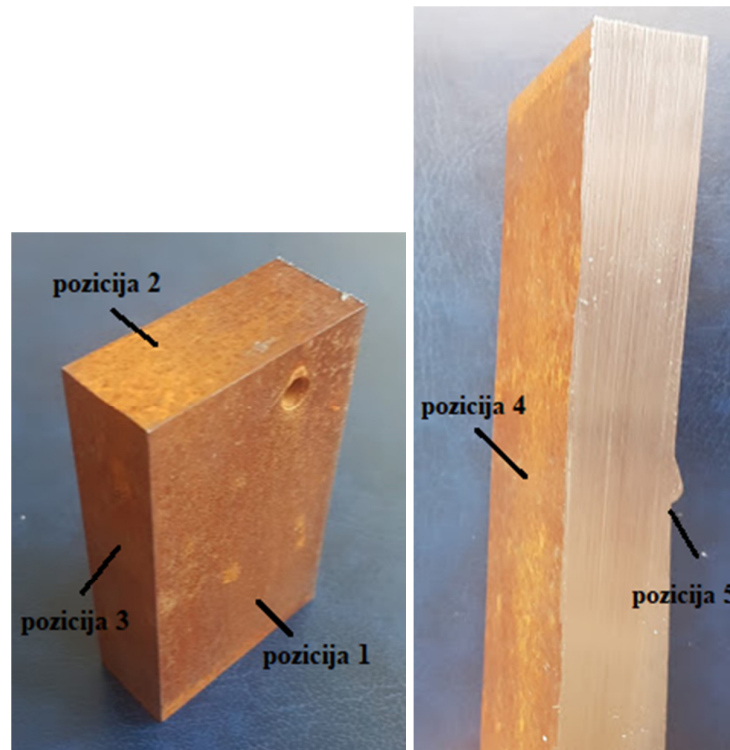
Sredstvo je poznato pod nazivom Nital (3%-tni).

Trajanje nagrizanja je oko 7 sekundi. Nakon toga uzorci su isprani u vodi i alkoholu, posušeni te analizirani u nagrizenom stanju.

### 5.6.2. Analiza na svjetlosnom mikroskopu

#### **Polirano stanje:**

U poliranom stanju vide se oksidni slojevi na površini uzoraka. Kod svakog uzorka snimljeni su slojevi na površinama i pozicijama prikazanim na slici 32.

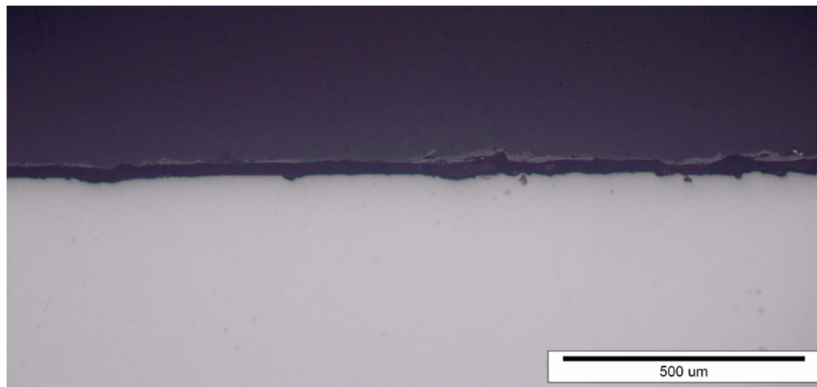


Slika 32. Pozicije za analizu oksidnog sloja

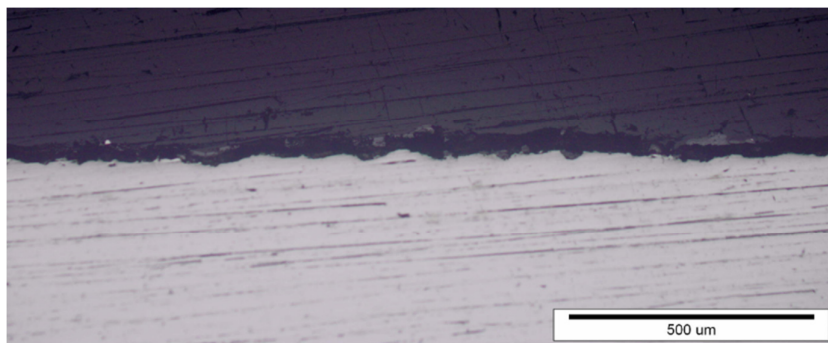
#### **Ruralna atmosfera:**

Slike oksidnog sloja uzoraka s pet prethodno naznačenih pozicija, snimljene pri različitim povećanjima, prikazane su na slikama od 33 do 38.





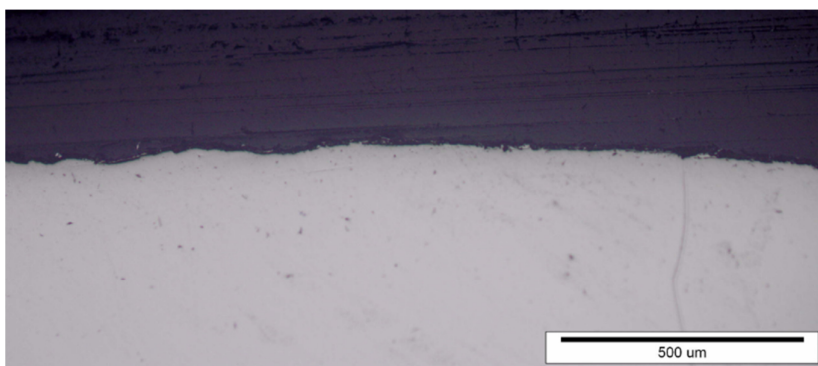
**Slika 33. Oksidni sloj na poziciji 1 (ruralna atmosfera)**



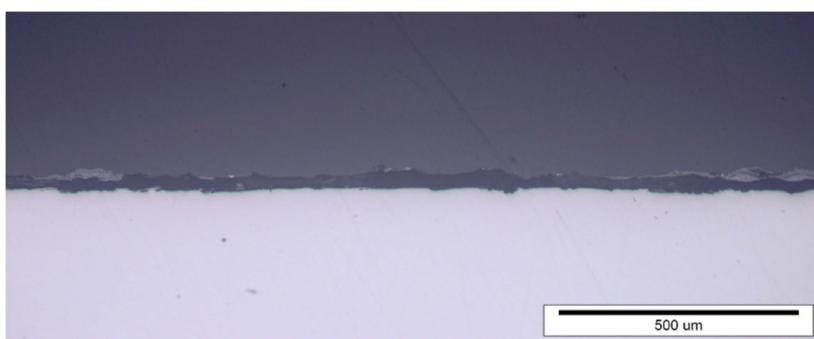
**Slika 34. Oksidni sloj na poziciji 2 (ruralna atmosfera)**



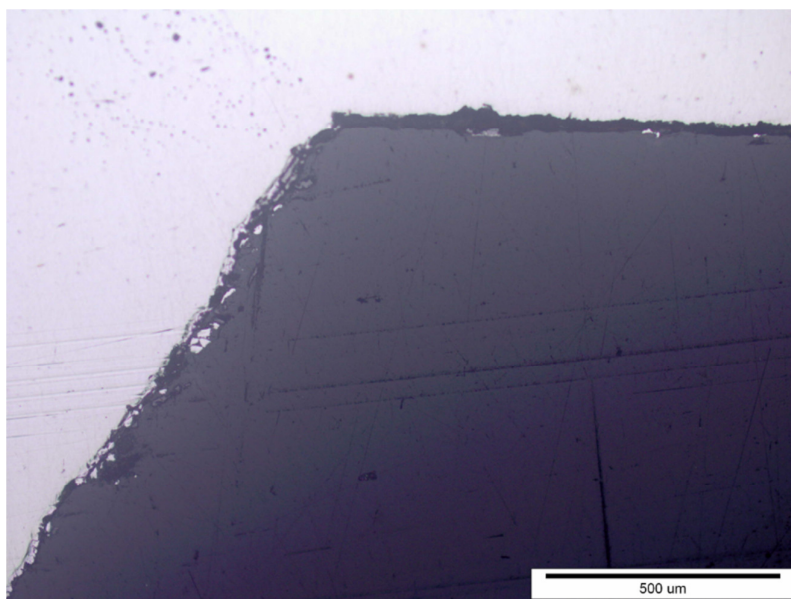
**Slika 35. Isto kao slika 33 uz veće povećanje**



**Slika 36. Oksidni sloj na poziciji 3 (ruralna atmosfera)**



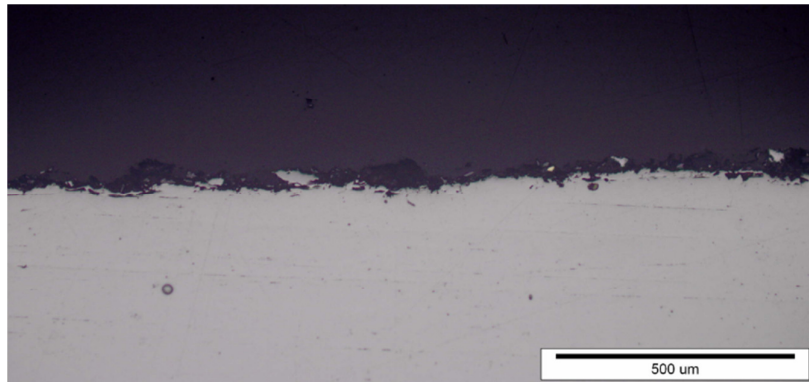
**Slika 37. Oksidni sloj na tjemenu zavora (pozicija 4)**



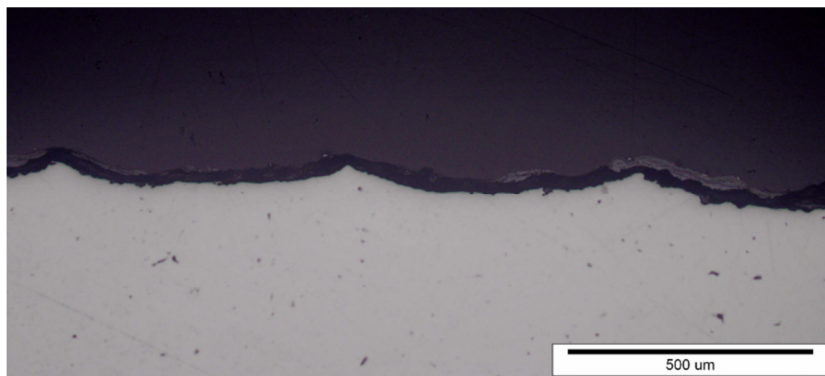
**Slika 38. Oksidni sloj na korijenu zavora (pozicija 5)**

**- Industrijska atmosfera:**

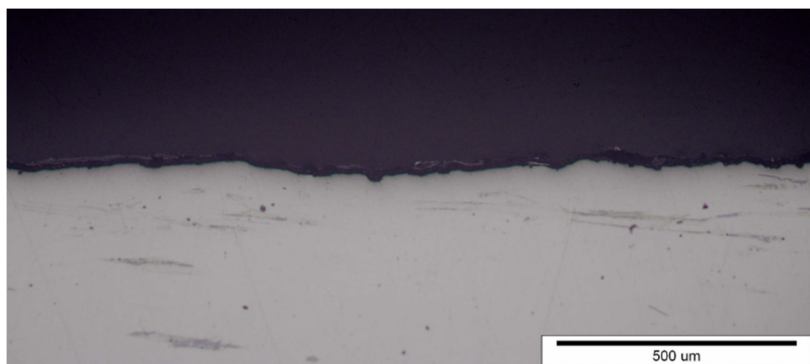
Na slikama od 39 do 45 prikazani su oksidni slojevi na pet karakterističnih pozicija na uzorku koji je 200 dana bio izložen industrijskoj atmosferi.



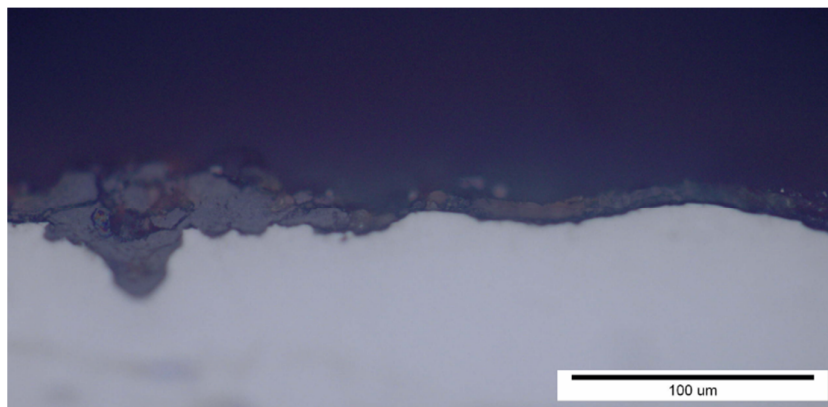
**Slika 39. Oksidni sloj na poziciji 1 (industrijska atmosfera)**



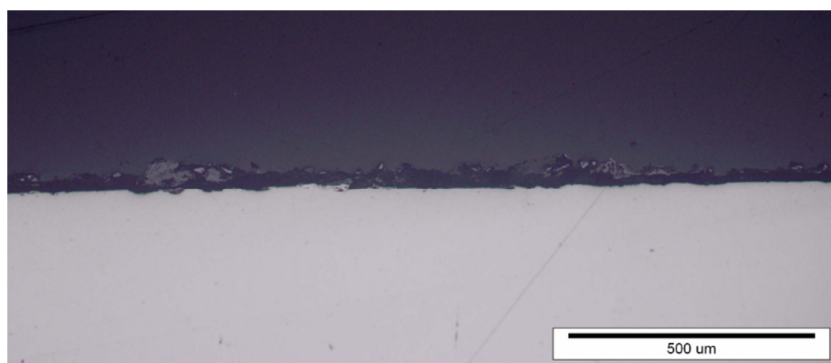
**Slika 40. Oksidni sloj na poziciji 2 (industrijska atmosfera)**



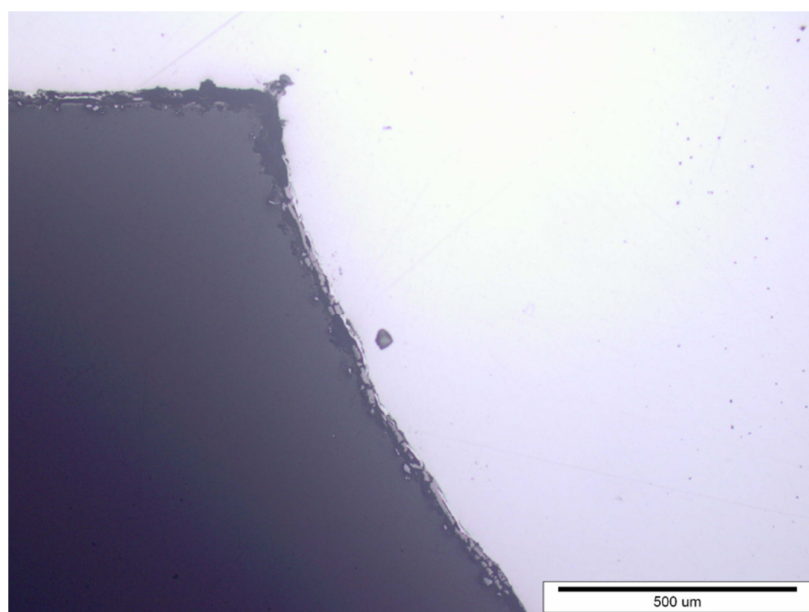
**Slika 41. Oksidni sloj na poziciji 3 (industrijska atmosfera)**



**Slika 42. Isto kao slika 41 uz veće povećanje**

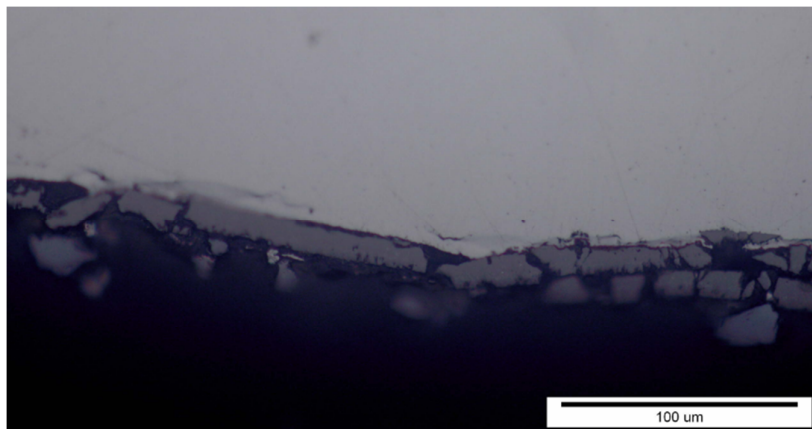


**Slika 43. Oksidni sloj na tjemenu zavora (pozicija 4)**



**Slika 44. Oksidni sloj na korijenu zavora (pozicija 5)**

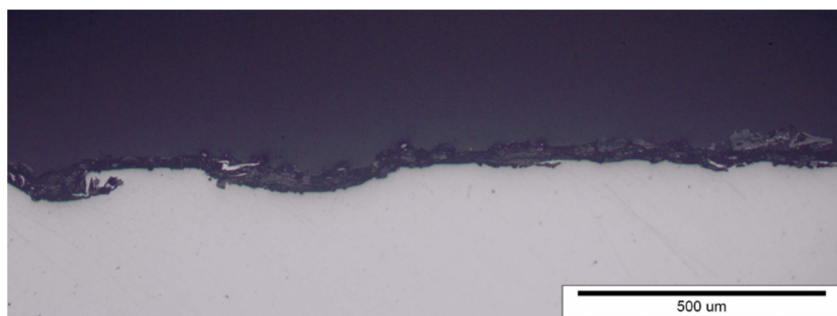




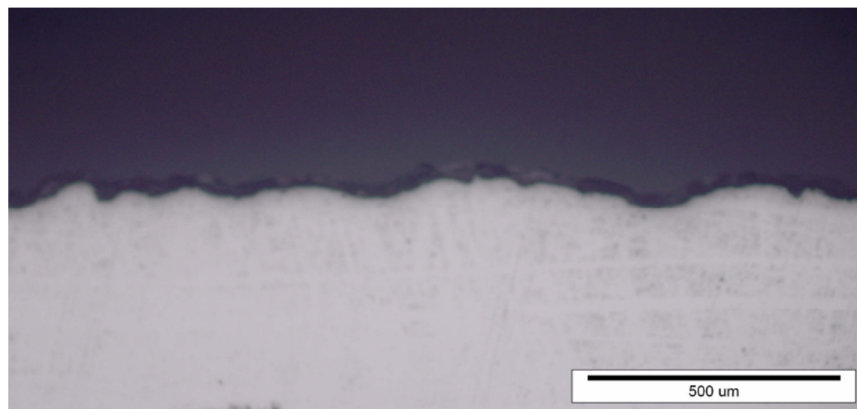
**Slika 45. Isto kao slika 44 uz veće povećanje**

**- Morska atmosfera:**

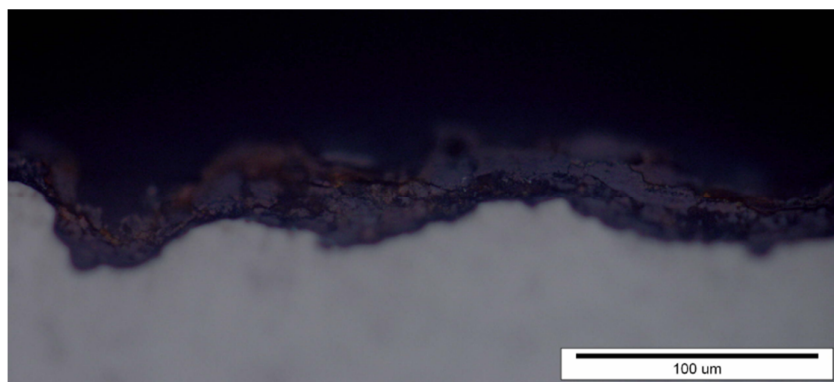
Na slikama od 46 do 53 prikazani su oksidni slojevi na pet karakterističnih pozicija na uzorku koji je 200 dana bio izložen morskoj atmosferi.



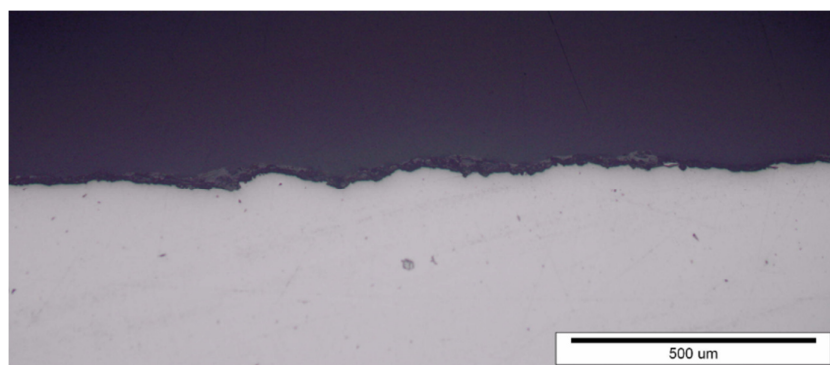
**Slika 46. Oksidni sloj na poziciji 1 (morska atmosfera)**



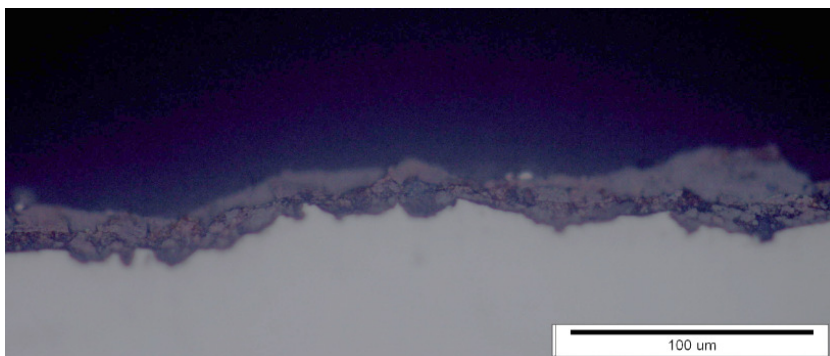
**Slika 47. Oksidni sloj na poziciji 2 (morska atmosfera)**



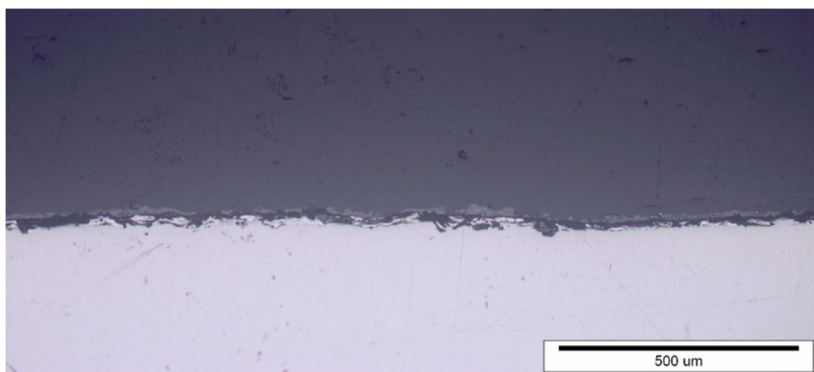
**Slika 48. Isto kao i slika 47 uz veće povećanje**



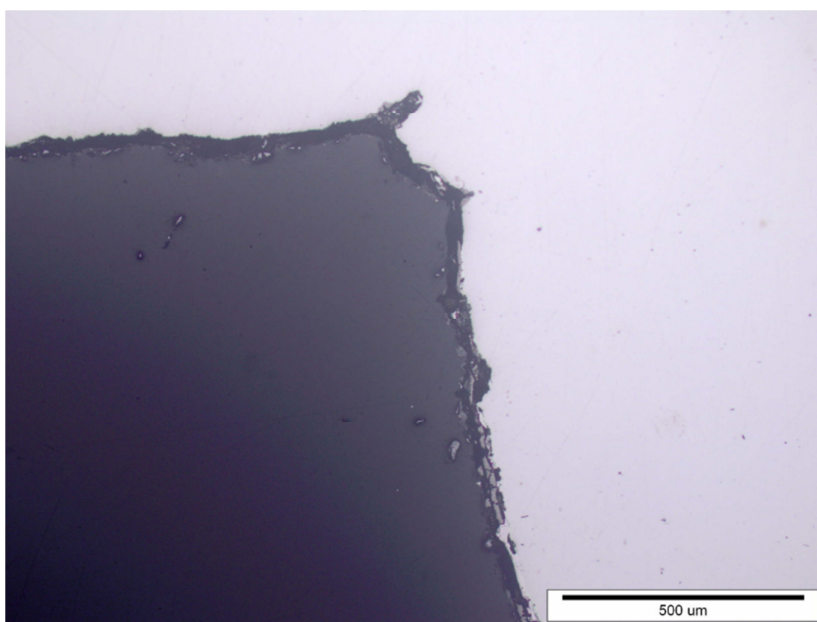
**Slika 49. Oksidni sloj na poziciji 3 (morska atmosfera)**



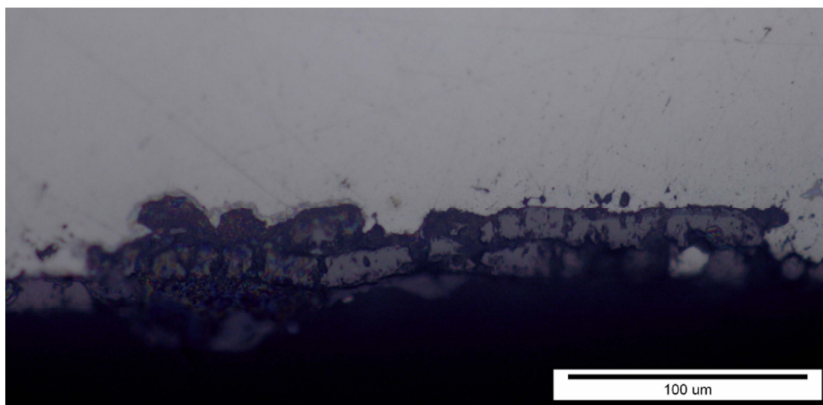
**Slika 50. Isto kao slika 49 uz veće povećanje**



**Slika 51. Oksidni sloj na tjemenu zavara (pozicija 4)**



**Slika 52. Oksidni sloj na korijenu zavara (pozicija 5)**

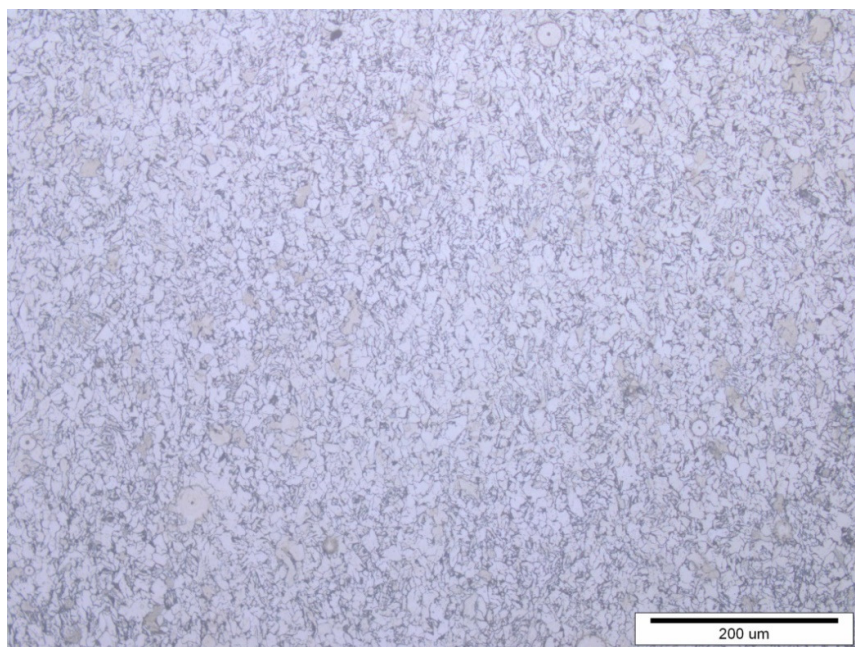


**Slika 53. Isto kao slika 52 uz veće povećanje**

***Nagriženo stanje:***

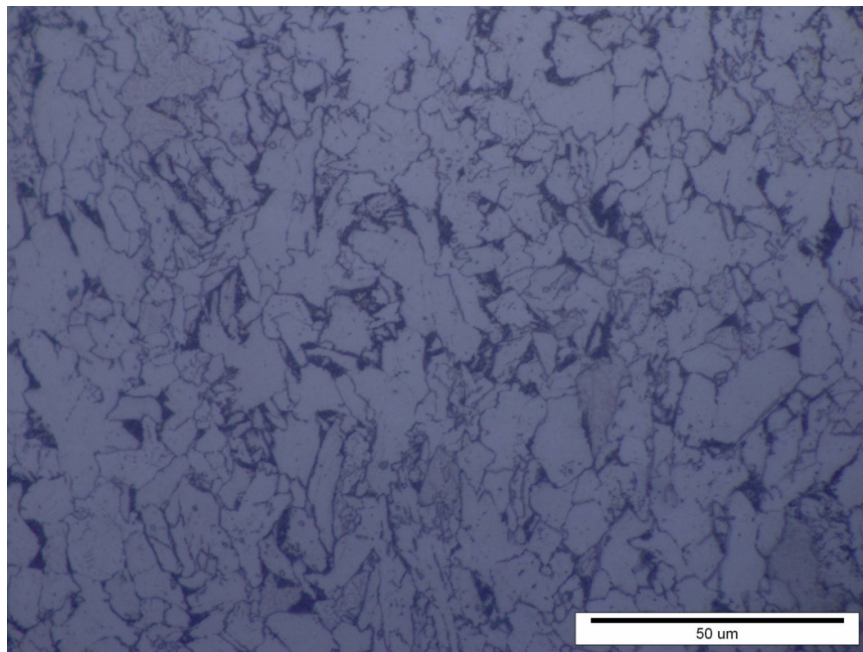
Nakon analiziranja površine u poliranom stanju analizirana je površina uzoraka u nagriženom stanju pri različitim povećanjima. Na slikama od 54 do 57 prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala paralelno i okomito na smjer valjanja, snimljena pri različitim povećanjima.

Mikrostruktura se uglavnom sastoji od ferita što je i očekivano s obzirom na vrlo mali sadržaj ugljika. Uz ferit, prisutan je i vrlo mali udio perlita. Mikrostruktura je izrazito sitnozrnata, neusmjerena. Nema razlike s obzirom na smjer valjanja.

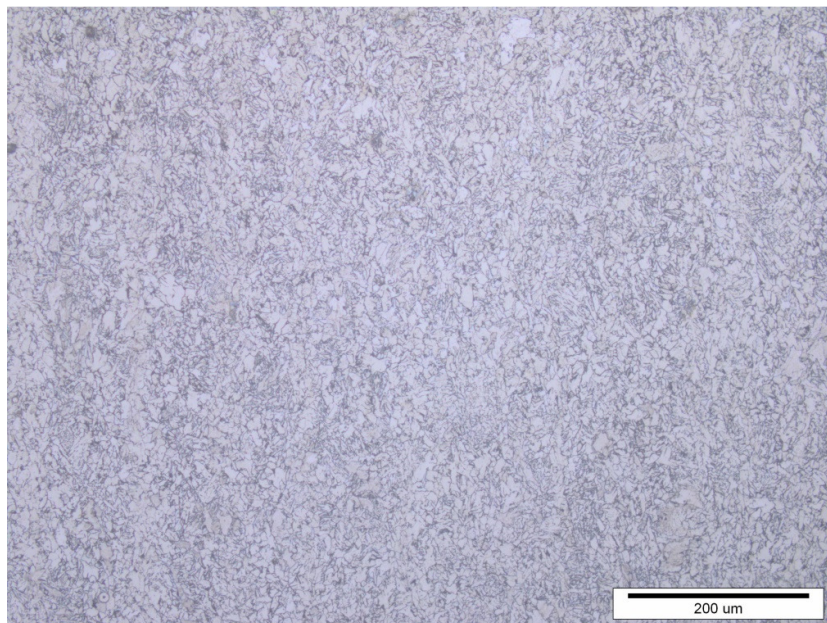


**Slika 54. Mikrostruktura osnovnog materijala okomito na smjer valjanja**

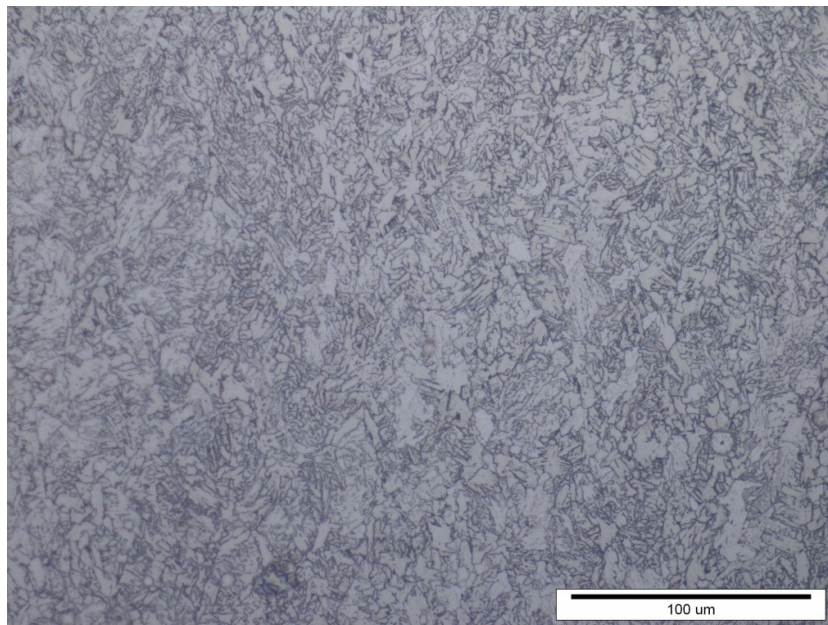




**Slika 55. Isto kao i slika 54 uz veće povećanje**



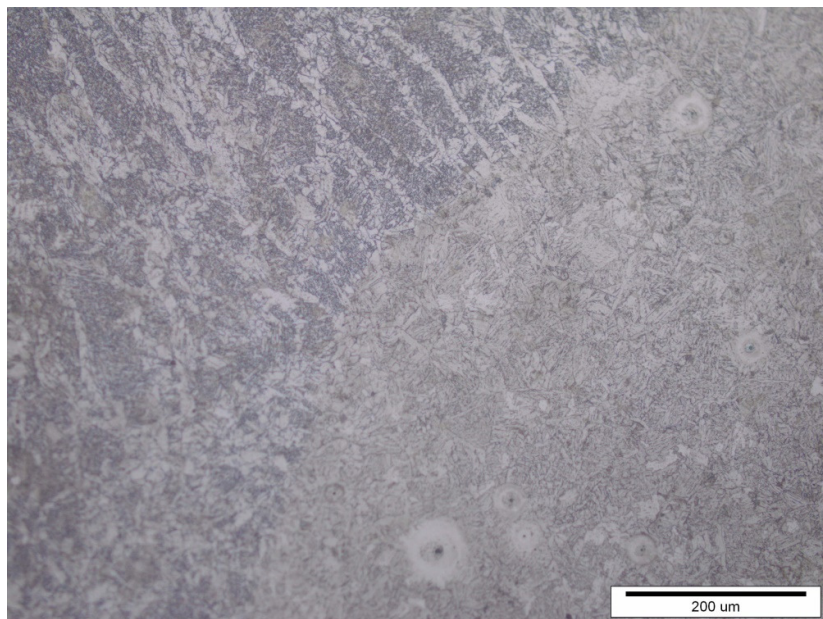
**Slika 56. Mikrostruktura osnovnog materijala u smjeru valjanja**



**Slika 57. Isto kao i slika 56 uz veće povećanje**

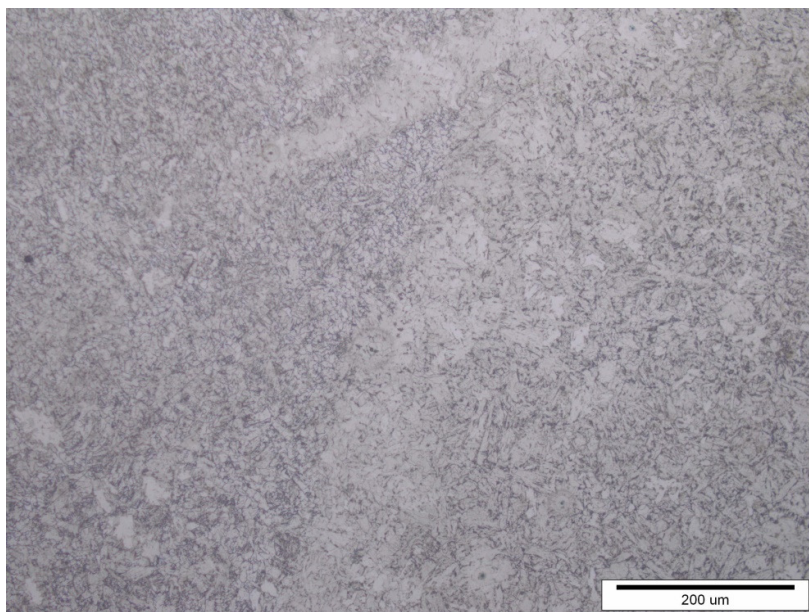
Na slikama od 58 do 63 prikazana je mikrostruktura zavarenog spoja u zoni utjecaja topline i metalu zavara, u tjemenu, sredini i korijenu zavora.

Zona utjecaja topline je vrlo uska, a linija staljivanja jasno izražena. U metalu zavara vidljiva je tipična ljevačka mikrostruktura. Pojedini prolazi nisu izraženi. Nema vidljivih nepravilnosti.

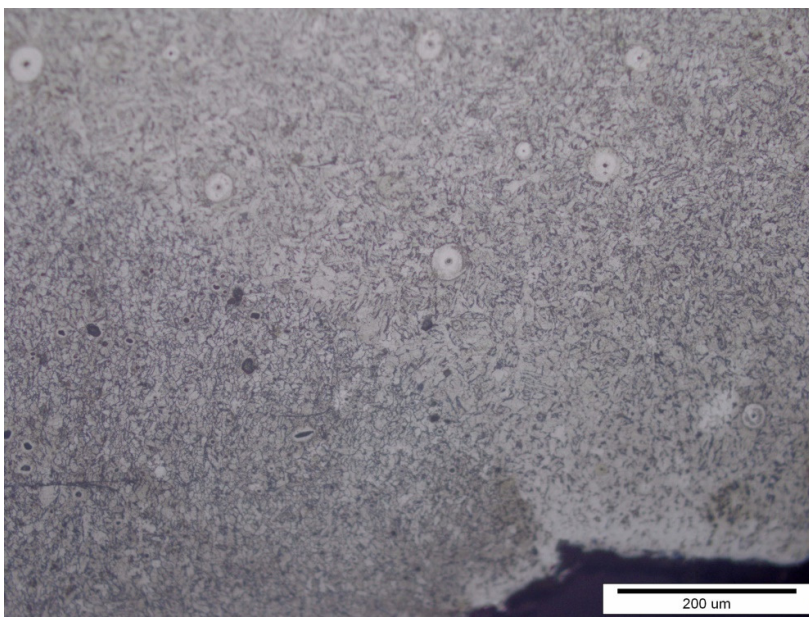


**Slika 58. Mikrostruktura zone utjecaja topline, tjeme zavora**

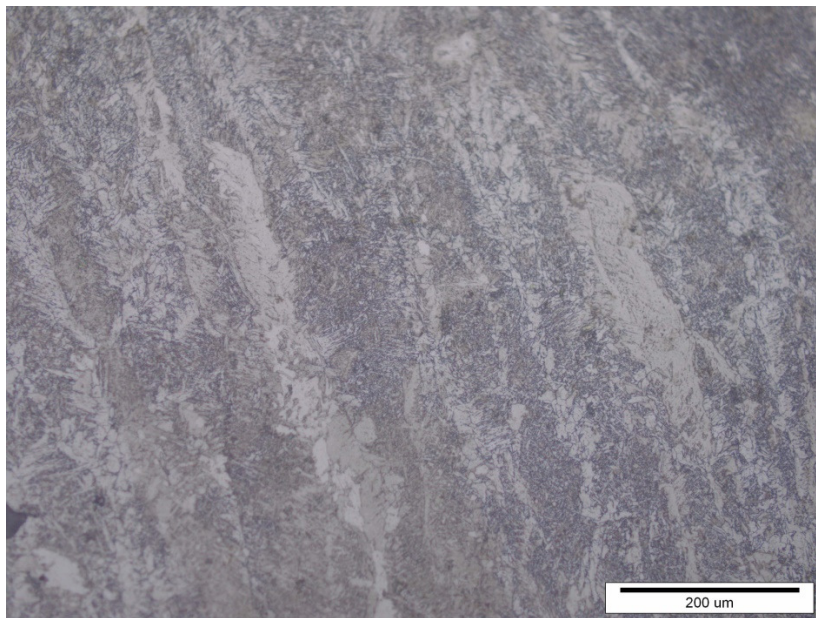




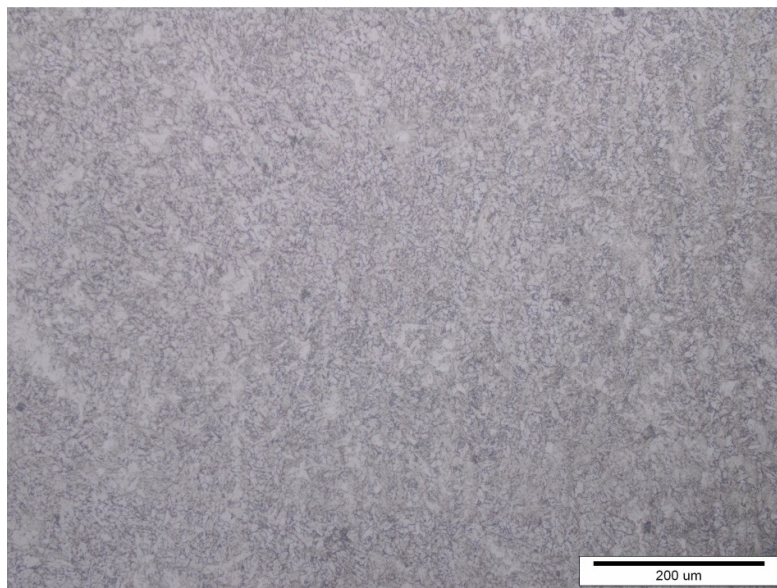
**Slika 59. Mikrostruktura zone utjecaja topline, sredina zavara**



**Slika 60. Mikrostruktura zone utjecaja topline, korijen zavara**

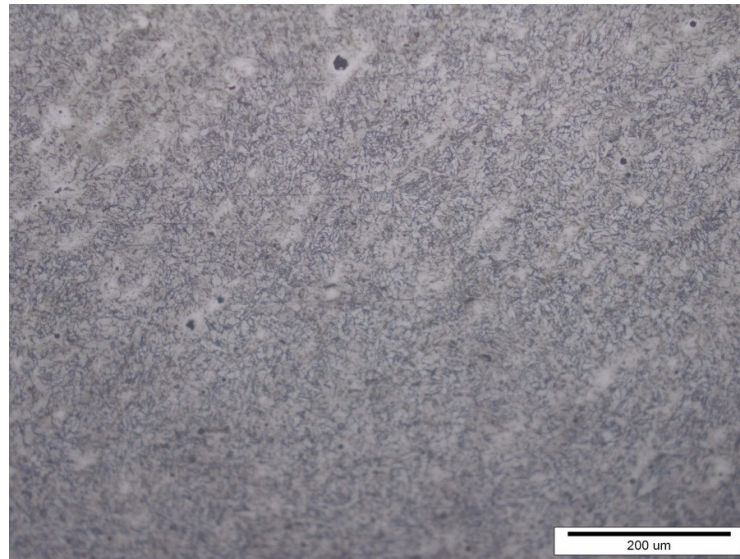


**Slika 61. Mikrostruktura metala zavora, tjeme zavora**



**Slika 62. Mikrostruktura metala zavora, sredina zavora**





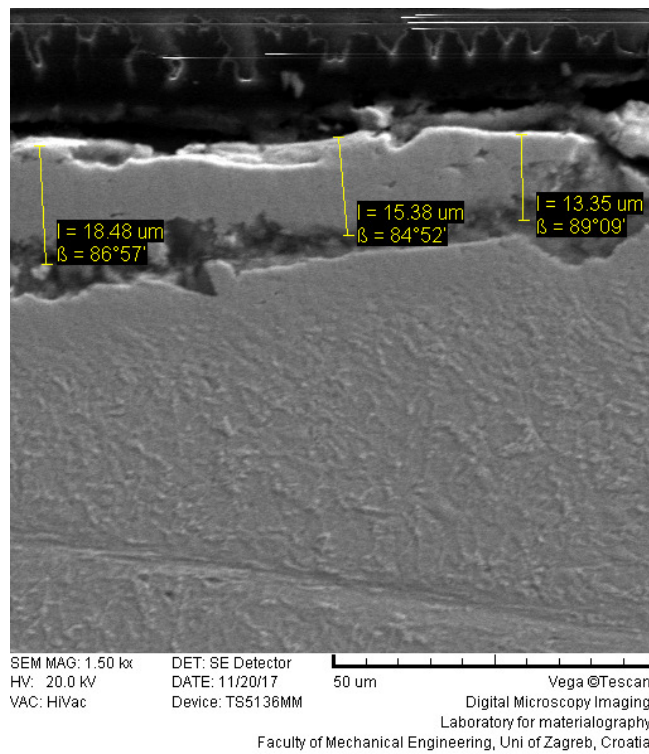
**Slika 63. Mikrostruktura metala zavora, korijen zavora**

#### ***5.6.3. Analiza na pretražnom elektronskom mikroskopu***

U Laboratoriju za materijalografiju provedena je analiza oksidnog sloja na površinama uzoraka sa zavarom na pretražnom elektronskom mikroskopu (SEM) Tescan Vega TS5136LS. Dva su uzorka analizirana u poliranom stanju te jedan uzorak u nagriženom stanju.

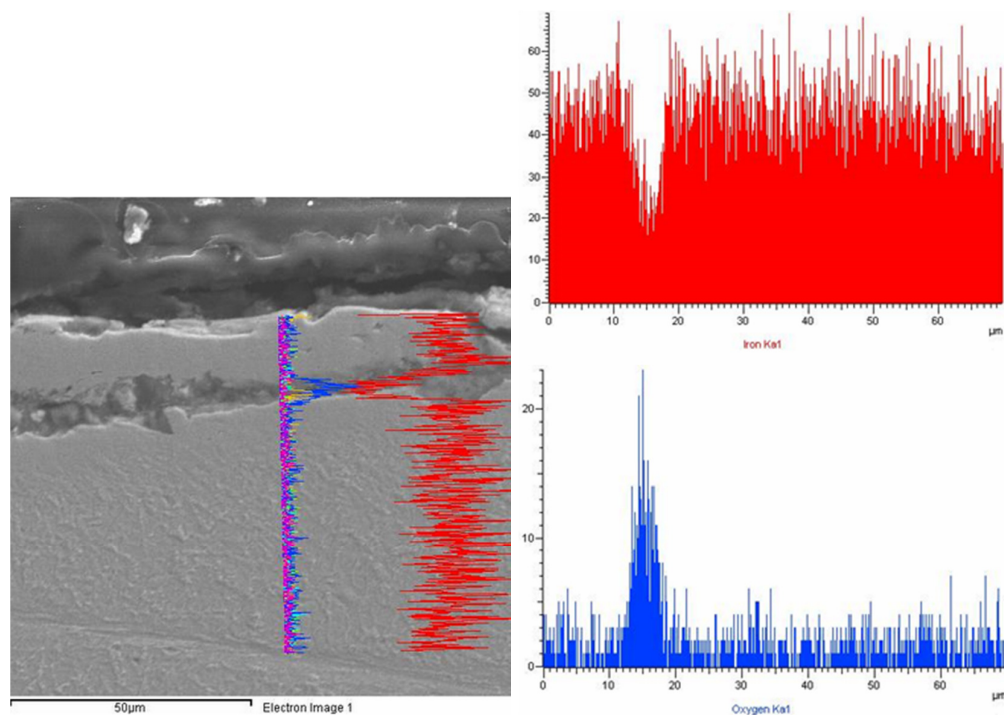
#### **- Ruralna atmosfera:**

Na slici 64 prikazan je nastali oksidni sloj na osnovnom materijalu s izmjerenom debljinom sloja.



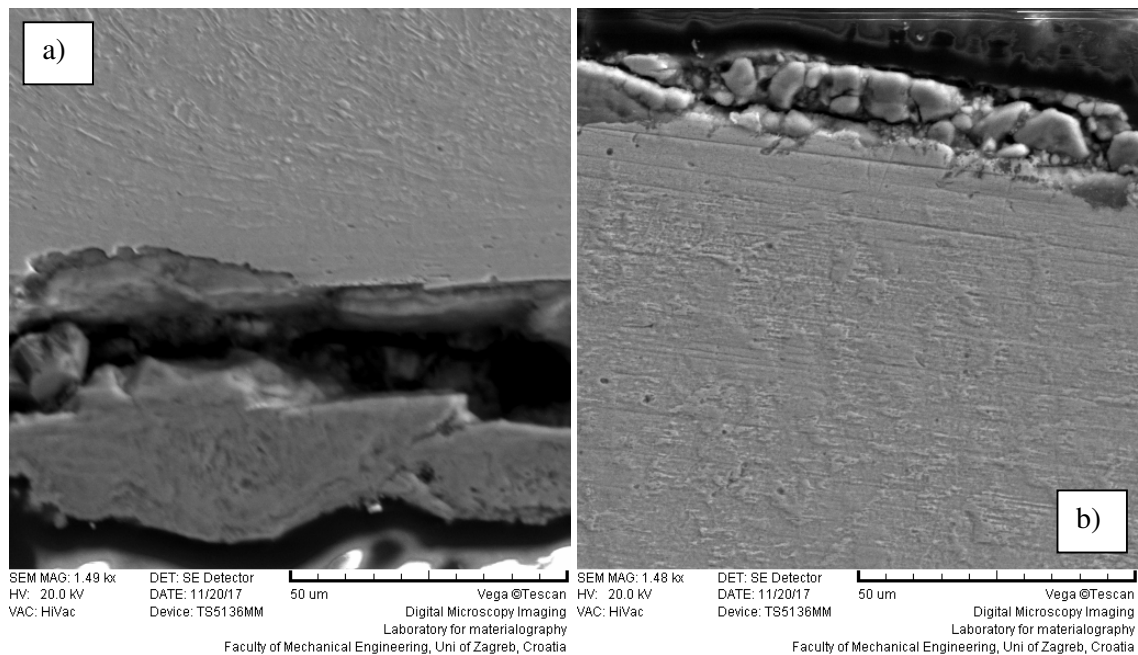
**Slika 64. Debljina oksidnog sloja (ruralna atmosfera)**

Rezultati EDS analize oksidnog sloja na originalnoj površini osnovnog materijala prikazanog su na slici 65.



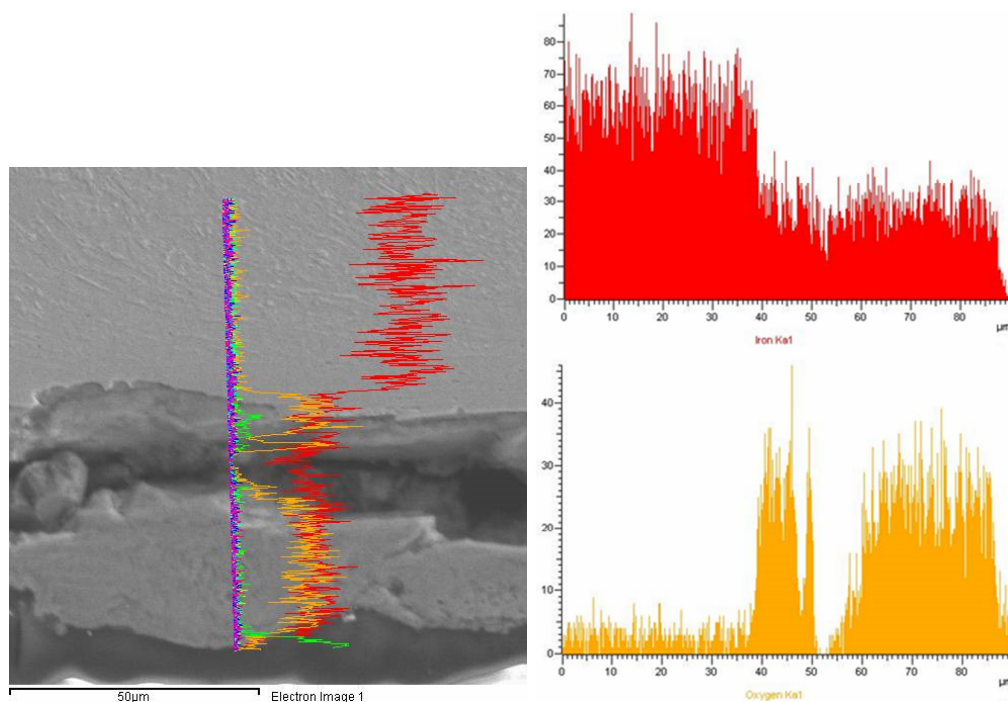
**Slika 65. Rezultati EDS analize osnovnog materijala i oksidnog sloja (Fe - crveno, O - plavo)**

Na slici 66 prikazan je oksidni sloj nastao na tjemenu i na korijenu zavora.

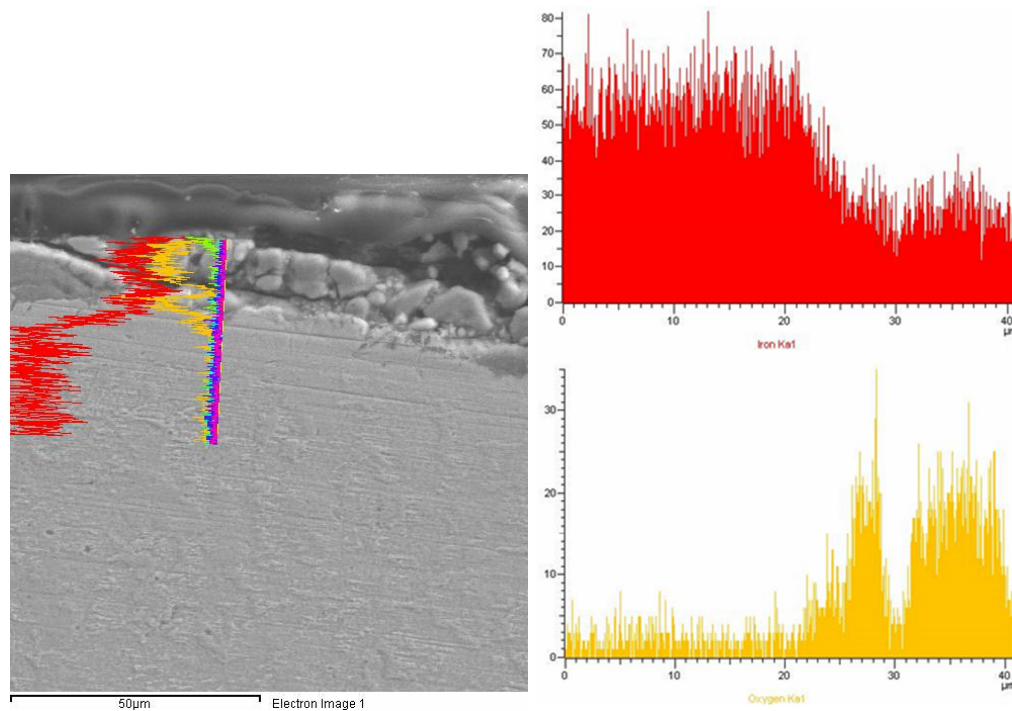


**Slika 66. Oksidni sloj na tjemenu zavora (a) i korijenu zavora (b) (ruralna atmosfera)**

Na slikama 67 i 68 prikazani su rezultati EDS analize na tjemenu i korijenu zavora



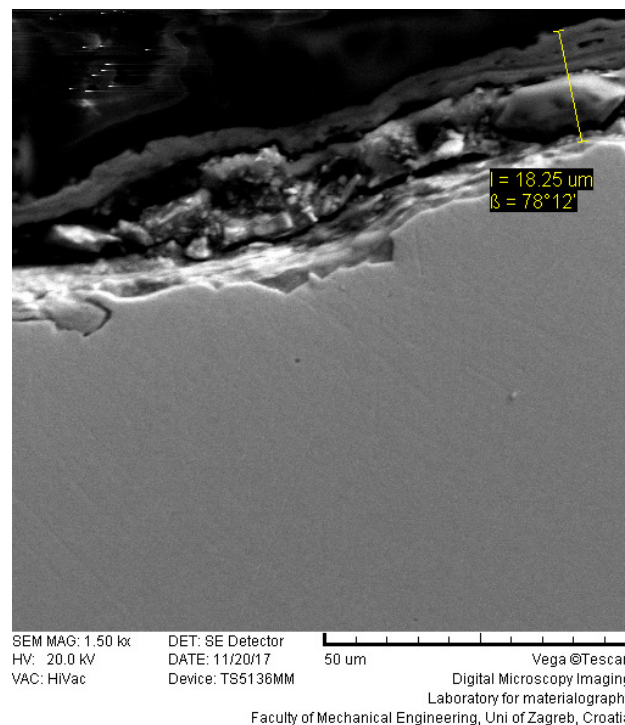
**Slika 67. Rezultati EDS analize na tjemenu zavora (Fe – crveno, O – žuto)**



**Slika 68. Rezultati EDS analize na korijenu zavora (Fe – crveno, O – žuto)**

#### - Industrijska atmosfera:

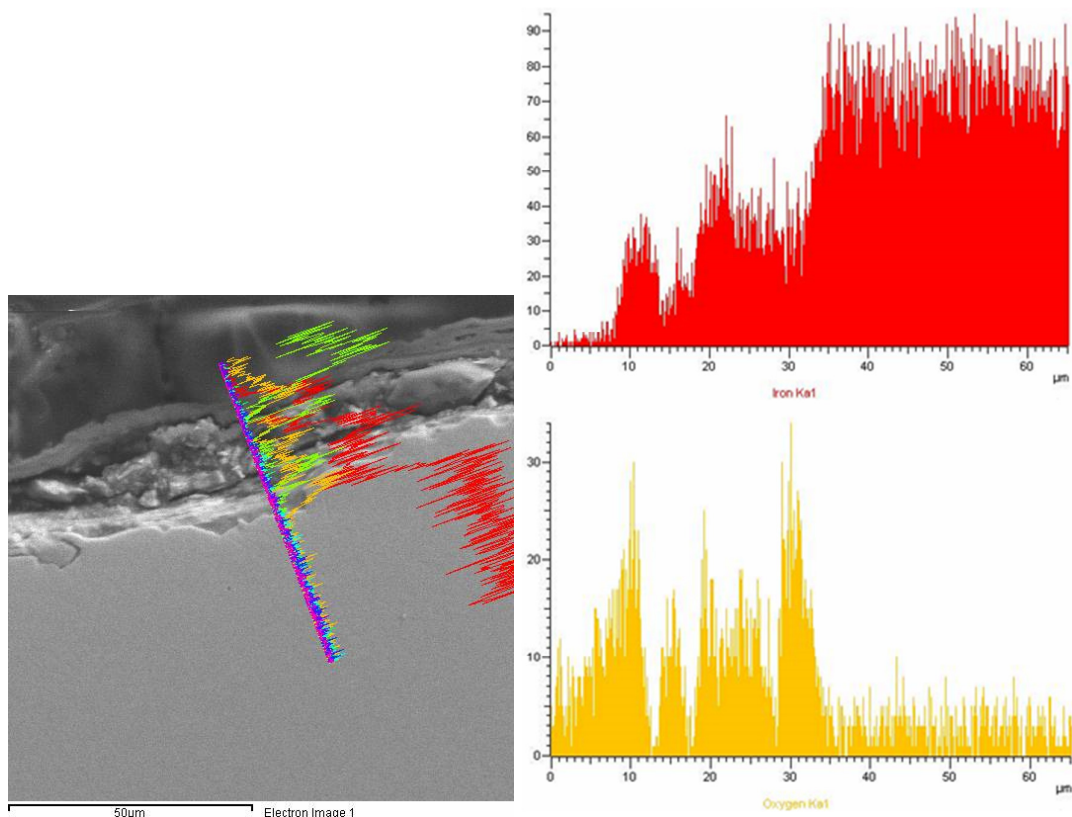
Na slici 69 prikazan je nastali oksidni sloj na osnovnom materijalu s izmjerenom debljinom sloja.



**Slika 69. Debljina oksidnog sloja (industrijska atmosfera)**

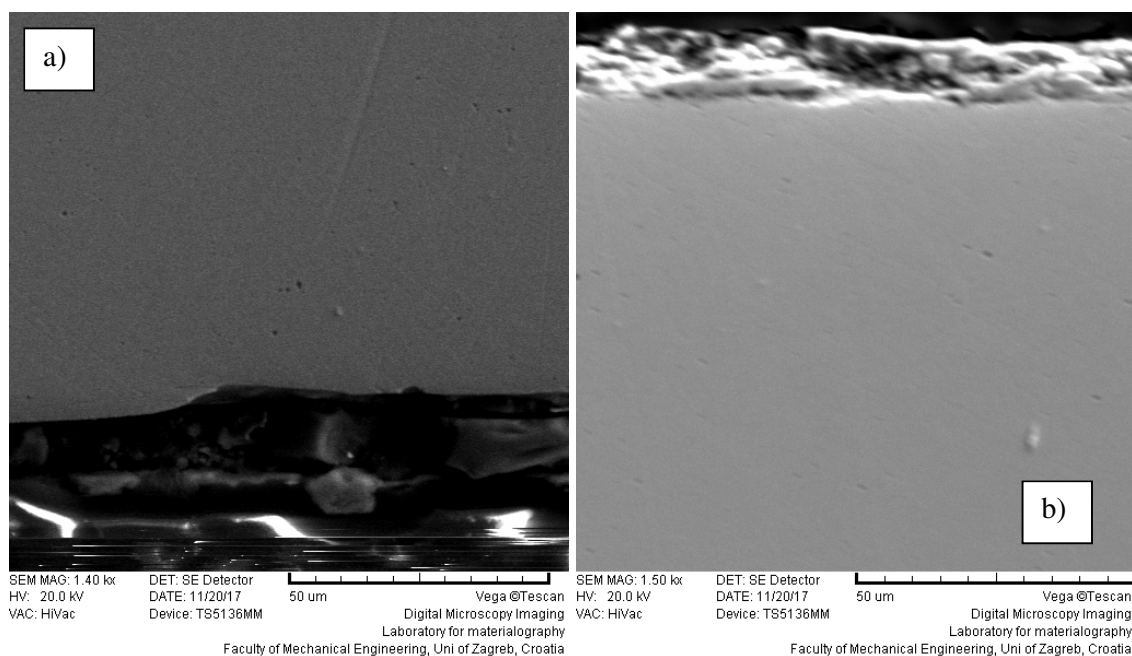


Rezultati EDS analize oksidnog sloja na osnovnom materijalu prikazani su na slici 70.



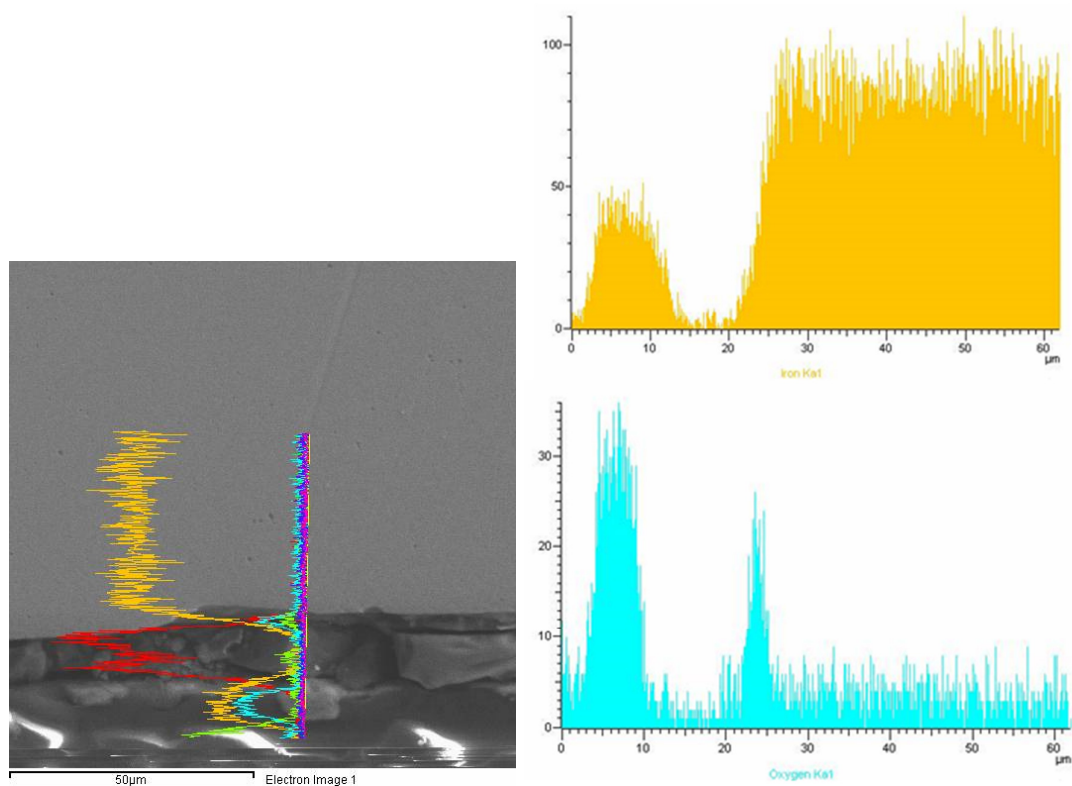
**Slika 70. Rezultati EDS analize osnovnog materijala i oksidnog sloja (Fe – crveno, O – žuto)**

Na slici 71 prikazan je oksidni sloj nastao na tjemenu zavora pri povećanju x1400 i na korijenu zavora pri povećanju x1500.

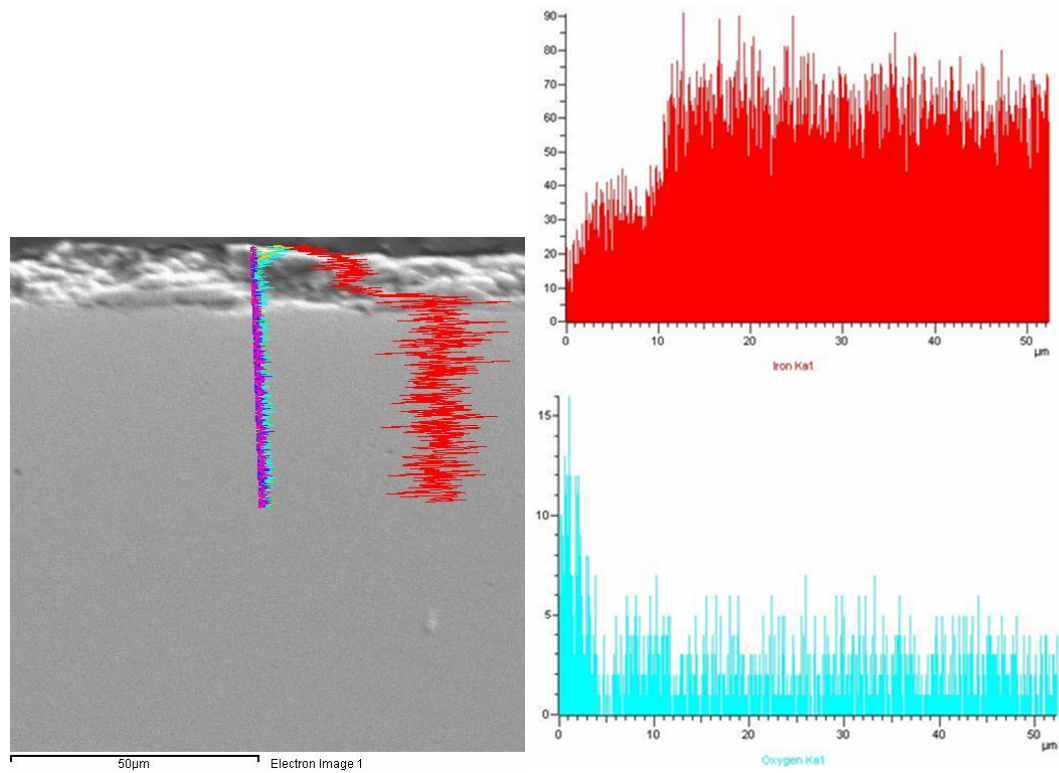


**Slika 71. Oksidni sloj na tjemenu zavora (a) i korijenu zavora (b) (industrijska atmosfera)**

Na slici 72 i 73 prikazani su rezultati EDS analize na tjemenu i korijenu zavora



**Slika 72. Rezultati EDS analize na tjemenu zavora (Fe – žuto, O – plavo)**

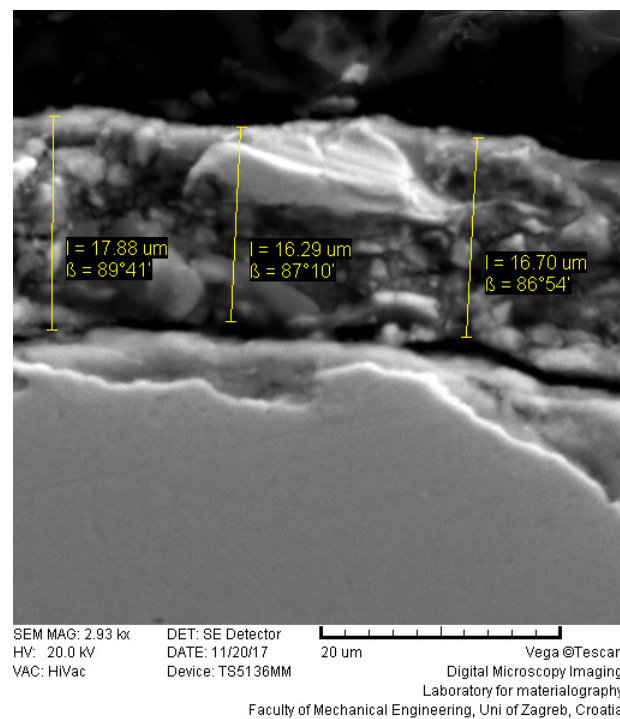


**Slika 73. Rezultati EDS analize na korijenu zavora (Fe – crveno, O – plavo)**

**- Morska atmosfera:**

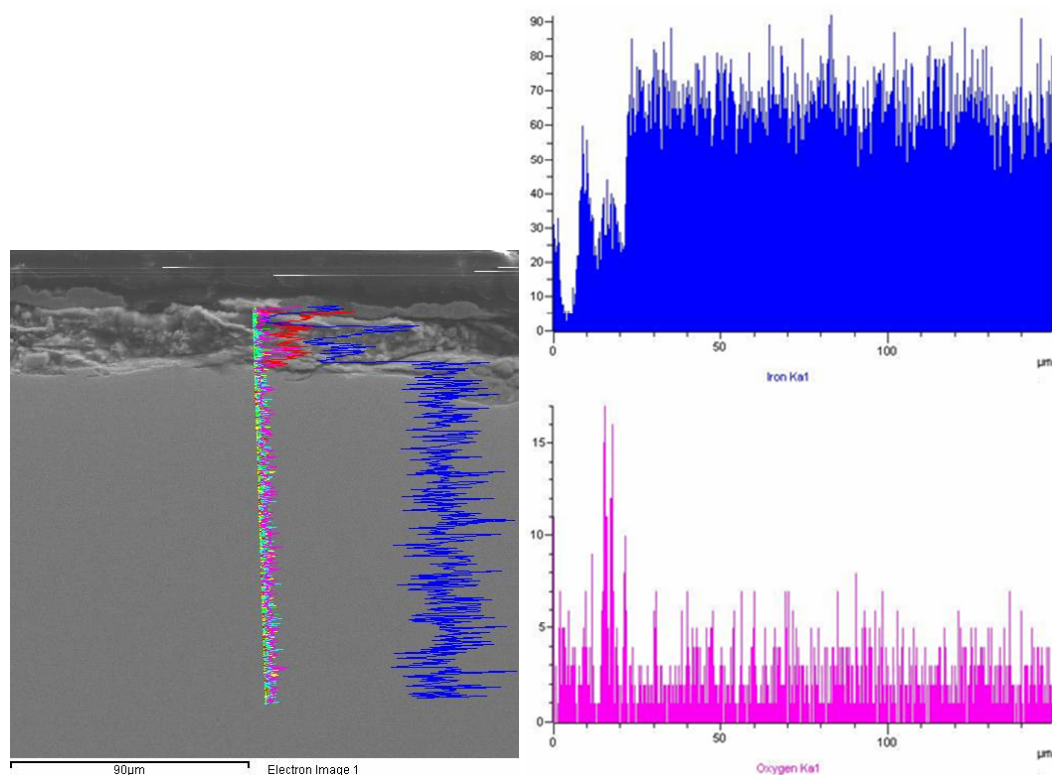
Na slici 74 prikazan je nastali oksidni sloj na osnovnom materijalu s izmjerenom debljinom sloja.





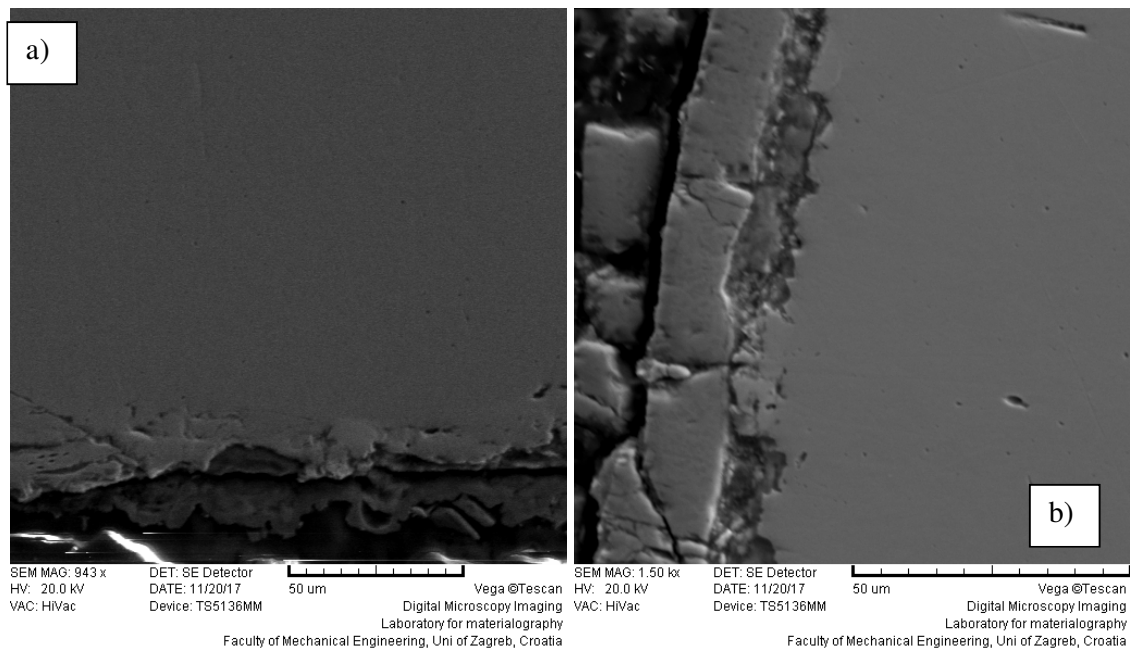
**Slika 74. Debljina oksidnog sloja (morska atmosfera)**

Rezultati EDS analize oksidnog sloja na osnovnom materijalu prikazani su na slici 75.



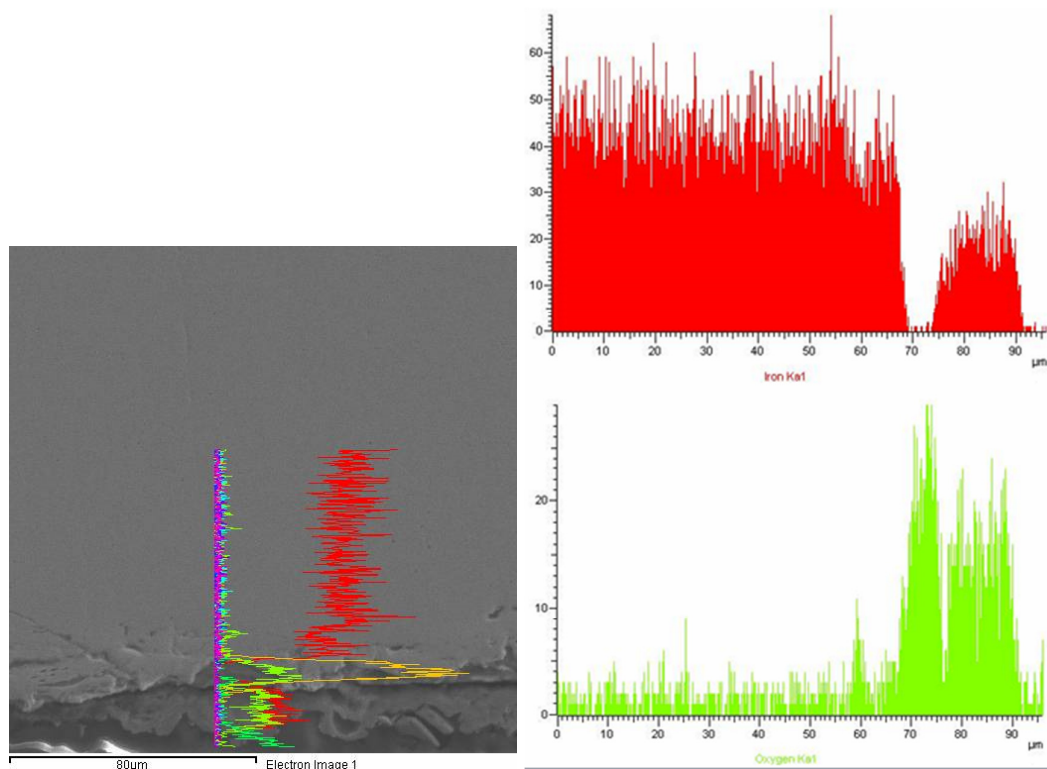
**Slika 75. Rezultati EDS analize osnovnog materijala i oksidnog sloja (Fe – plavo, O – ljubičasto)**

Na slici 76 prikazan je oksidni sloj nastao na tjemenu zavora pri povećanju x943 i na korijenu zavora pri povećanju x1500.

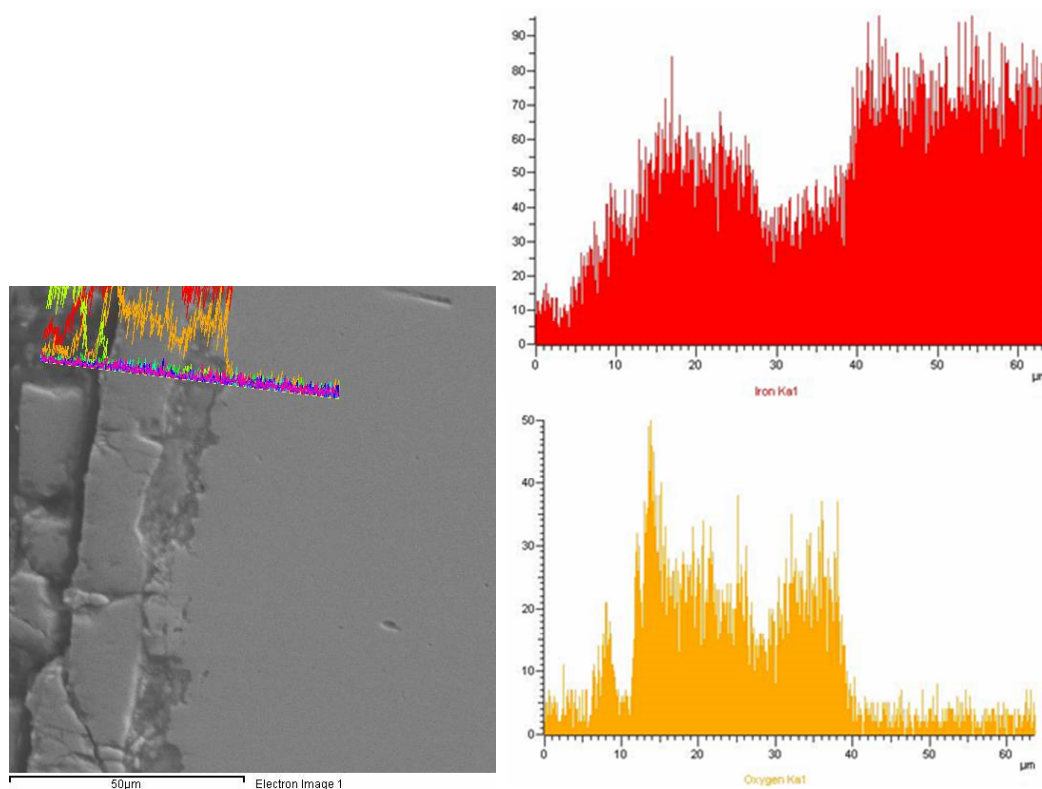


**Slika 76. Oksidni sloj na tjemenu zavora (a) i korijenu zavora (b) (morska atmosfera)**

Na slici 77 i 78 prikazani su rezultati EDS analize na tjemenu i korijenu zavora



**Slika 77. Rezultati EDS analize na tjemenu zavora (Fe – crveno, O – zeleno)**



**Slika 78. Rezultati EDS analize na korijenu zavora (Fe – crveno, O – žuto)**

### 5.7. Mjerenje mikrotvrdoće

Mjerenje tvrdoće ispitnog uzorka provedeno je na uređaju Wolpert – Wilson Tukon 2100B metodom po Vickersu pri opterećenju 1,962 N (HV0,2). Mjerenje tvrdoće provedeno je na nagriženom uzorku sa zavarom. Tvrdoća je mjerena u osnovnom materijalu, u ZUT-u i metalu zavora. Napravljena su po tri mjerenja na tjemenu, u sredini i na korijenu zavora.

U tablici 15 prikazani su rezultati mjerenja mikrotvrdoće kao i njihove srednje vrijednosti.

**Tablica 15. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće**

Pozicija:	Mjerenje:			Sr. vrijednost
		1	2	3
<b>Metal zavora</b>	tjeme	210	207	219
	sredina	221	221	217
	korijen	207	212	221
<b>ZUT</b>	tjeme	205	189	199
	sredina	210	203	207
	korijen	197	207	203
<b>Osnovni materijal</b>	sredina	199	203	195

### 5.8. Ispitivanje mehaničkih svojstava

Ispitivanje mehaničke otpornosti materijala provedeno je u Zavodu za zavarivanje, ispitivanje i tehnologiju (ZIT). Statičko vlačno ispitivanje provedeno je na kidalici marke "WOLPERT" prikazanoj na slici 80.

Ispitivanje je provedeno na standardnoj normalnoj kratkoj epruveti okruglog poprečnog presjeka pri temperaturi 20 °C. Uzorci su izrezani iz ploče debljine 20 mm i širine 2000 mm.

U tablici 16. prikazane su vrijednosti mehaničkih svojstava dobivenih statičkim vlačnim ispitivanjem. Dobiveni rezultati su u propisanom granicama.

**Tablica 16. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja**

$R_e$ , [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ , [N/mm <sup>2</sup> ]	$A$ , [%]
481	566	32,1



**Slika 79. Kidalica "Wolpert"**

## 6. OSVRT NA REZULTATE

### Osvrt na rezultate analize kemijskog sastava

Kemijski sastav osnovnog materijala je u granicama koje su propisane za čelik S355J0WP+AR. Vrlo nizak sadržaj nečistoća (S i P), relativno nizak sadržaj ugljika od približno 0,08 % te mali, ali važni udjeli bakra, kroma i nikla osiguravaju povišenu otpornost ovog čelika na djelovanje atmosferske korozije. Osim toga osiguravaju potrebna mehanička i tehnološka svojstva čelika. Inače ovaj čelik spada u skupinu čelika s nezajamčenim kemijskim sastavom i nije predviđen za toplinsku obradu. To ne znači da čelik nije toplinski obrađen već da se potrebna toplinska obrada obavlja u čeličani prije isporuke materijala.

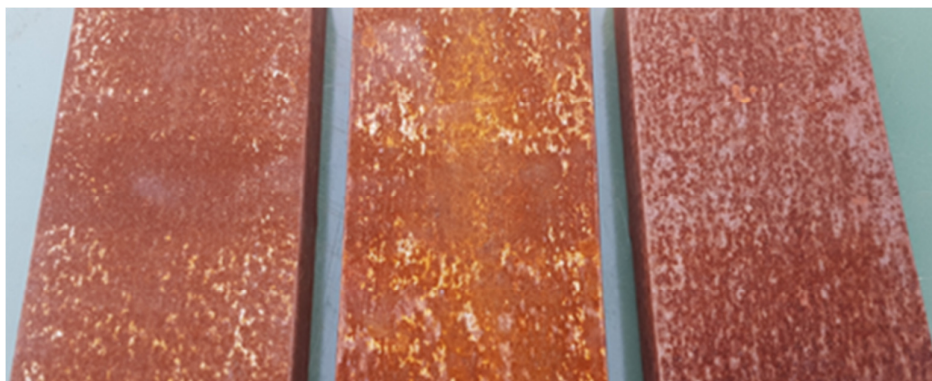
### Osvrt na rezultate vizualne kontrole oksidirane površine

Vizualnim pregledom utvrđena je velika razlika u izgledu oksidiranih površina uzoraka. Uzorak koji je bio izložen djelovanju morske atmosfere je puno neujednačenije korodirao u odnosu na druga dva uzorka. Oksidi su mjestimice dublje prodrli u površinu osnovnog materijala što je rezultiralo neujednačenom bojom površine. U odnosu na druga dva uzorka boja je zagasitija i manje atraktivna. Uzorci koji su bili izloženi djelovanju ruralne i industrijske atmosfere su relativno slični, površina im je ravnomjerno i skoro u potpunosti prekrivena oksidima lijepe, crveno-smeđe boje.

Također je važno napomenuti da je uočena velika razlika u strukturi oksidnog sloja između originalne i poglodane površine uzoraka. Originalna površina svih uzoraka gotovo je u potpunosti prekrivena fino teksturiranim slojem željeznih oksida. Poglodana površina nije u potpunosti pokrivena oksidnim slojem, te je sloj na toj površini manje homogen u odnosu na originalnu površinu. Razlog tome je dodatna obrada površine poluproizvoda u čeličani prije isporuke. Detalji ove površinske obrade najčešće tajna su proizvođača i nisu poznati.

Osim gore navedenog potrebno je također istaknuti da je na poglodanoj površini svih uzoraka vidljiva razlika u intenzitetu korozije u području metala zavara u odnosu na osnovni materijal. Razlika je osobito vidljiva kod uzoraka izloženih djelovanju ruralne i industrijske atmosfere, slika 80.





**Slika 80. Razlike u intenzitetu korozije između osnovnog materijala i metala zavora (lijevo-ruralna, sredina-industrijska, desno-morska atmosfera)**

### **Osvrt na rezultate analize makrostrukture i mikrostrukture**

Analiza makrostrukture zavarenog spoja u poliranom i nagriženom stanju pokazala je visoku kvalitetu izvedenog zavarenog spoja. Nisu uočene nikakve nepravilnosti, jasno se vidi oblik zavora kao i linija staljivanja, a pojedini prolazi zavarivanja nisu izraženi. Struktura osnovnog materijala i struktura materijala u području ZUT-a se vrlo malo razlikuje.

Analiza osnovnog materijala čelika S355J0WP+AR pokazala je da se mikrostruktura sastoji od ferit i perlita. Udio ferita je puno veći što je bilo očekivano, s obzirom na vrlo mali sadržaj ugljika. Mikrostruktura je izrazito sitnozrnata i neusmjerena (nema razlike s obzirom na smjer valjanja). Analiza mikrostrukture zavarenog spoja pokazala je da je zavareni spoj kvalitetno izveden i nema vidljivih nepravilnosti. Zona utjecaja topline je vrlo uska, a linija staljivanja jasno izražena. U metalu zavora vidljiva je tipična ljevačka mikrostruktura, a pojedini prolazi zavarivanja nisu izraženi.

Posebna pozornost posvećena je oksidnom sloju na površini osnovnog materijala i zavarenog spoja na tjemenu i u korijenskom dijelu svih uzoraka.

Na uzorcima koji su bili izloženi ruralnoj atmosferi, debljina oksidnog sloja na poglodanoj površini osnovnog materijala iznosila je oko 0,03 mm (30  $\mu\text{m}$ ) (pozicije 1, 2 i 3 na slikama 33 do 38). Debljina oksidnog sloja na originalnoj površini osnovnog materijala je nešto manja (slika 38). Oksidni sloj na tjemenu zavora deblji je od oksidnog sloja na korijenu zavora (slike 37 i 38). Ovdje treba napomenuti da je na korijenskoj strani zavora sačuvana originalna površina dok je na tjemenu zavora poglodana površina. Debljina sloja na tjemenu zavora (oko 0,037 mm) je veća od debljine sloja na osnovnom materijalu.

Uzorci koji su bili izloženi djelovanju industrijske atmosfere, na svim pozicijama imaju 30-ak % veću debljinu oksidnog sloja od uzoraka izloženih ruralnoj atmosferi. Kao i kod prethodnih



uzoraka i ovdje je debljina oksidnog sloja na poglodanoj površini veća od debljine oksidnog sloja na izvornoj površini. U korijenskom dijelu zavara, uz liniju staljivanja uočeno je napredovanje korozije od površine prema unutrašnjosti (slika 43).

Najdeblji oksidni sloj (oko 0,059 mm) izmjeren je kod uzoraka koji su bili izloženi morskoj atmosferi (slike 46 do 53). Hrapavost površine je puno izraženija nego kod prethodnih uzoraka što znači da je korozija dublje prodrla u materijal. I ovdje je uočeno napredovanje korozije od površine prema unutrašnjosti uz liniju staljivanja na korijenskom dijelu zavara, još dublje nego kod uzorka iz industrijske atmosfere. Također je, kao i kod prethodnih uzoraka debljina oksidnog sloja na izvornoj površini nešto manja nego na poglodanoj površini.

### **Osvrt na rezultate EDS analize**

SEM/EDS analiza provedena je s ciljem utvrđivanja morfologije, debljine i elementarnog sastava korozijskih produkata nastalih na površini osnovnog materijala te tjemena i korjena zavara Corten čelika izloženog ruralnoj, industrijskoj i morskoj atmosferi 200 dana. Na SEM slikama poprečnih presjeka ispitanih uzoraka (slike od 64 do 78) može se vidjeti valovit i brežuljkast sloj korozijskih produkata. Morfološki najujednačeniji i najkompaktniji je sloj korozijskih produkata na čeliku izloženom ruralnoj atmosferi. Prema literaturi, na ovim čelicima nastaju dva sloja korozijskih produkata: vanjski (sadrži  $\alpha$ -FeOOH i  $\gamma$ -FeOOH) i unutarnji (sadrži amorfnog FeOOH s nešto kristalnog  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) [45].

Na SEM slikama se može uočiti kompaktniji vanjski i amorfnog unutarnji sloj. Unutarnji sloj se nalazi na granici između sloja korozijskih produkata i površine čelika te sadrži veliki broj pora i mikropukotina, stoga je oštećen i propusan za daljnje korozijske napade.

EDS linijska analiza uzoraka izloženih ruralnoj atmosferi prikazana je na slikama 65, 67 i 68. Na slikama 70, 72 i 73 prikazana je EDS linijska analiza uzoraka iz industrijske atmosfere, a na slikama 75, 77 i 78 iz morske atmosfere. EDS linijska analiza daje uvid u raspodjelu elemenata po referentnoj liniji koja je postavljena tako da ide od površine, na kojoj su korozijski produkti, do osnovnog materijala ili materijala zavara. Na svim ispitanim uzorcima utvrđena je prisutnost željeza i kisika u površinskom sloju čime je potvrđeno nastajanje korozijskih produkata. Prisutnost kisika u skladu je sa određenom debljinom sloja korozijskih produkata.

### **Osvrt na rezultate ispitivanja mehaničkih svojstava**

Usporedbom vrijednosti dobivenih pri statičkom vlačnom ispitivanju s vrijednostima koje propisuje proizvođač, vidi se da se dobivene vrijednosti nalaze u rasponima koje propisuje proizvođač. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće pokazali su da nema velikih razlika između vrijednosti na različitim pozicijama. Nešto veća tvrdoća izmjerena je u metalu zavara, a ZUT i osnovni materijal imaju vrlo sličnu tvrdoću. Kako je mikrostruktura osnovnog materijala i ZUT-a vrlo slična to je bilo i očekivano.

## 7. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja i pritom dobivenih rezultata može se zaključiti slijedeće:

- Iz analize kemijskog sastava može se vidjeti da čelik S355J0WP+AR sadrži oko 0,08 %C, vrlo nizak udio nečistoća (S i P) te, za njegovu korozijsku postojanost vrlo važne legirne elemente, Cu, Cr i Ni.

- Mikrostruktura osnovnog materijala je izrazito sitnozrnata, feritna s vrlo malim udjelom perlitne faze.

Analiza makrostrukture zavarenog spoja u poliranom i nagriženom stanju pokazala je visoku kvalitetu izvedenog zavarenog spoja. Struktura osnovnog materijala i struktura materijala u području ZUT-a se vrlo malo razlikuje. Metal zavara ima tipičnu ljevačku mikrostrukturu.

- Vizualnim pregledom utvrđena je velika razlika u intenzitetu korozije i izgledu oksidiranih površina uzoraka s različitih lokacija. Morska atmosfera je najagresivnije djelovala na materijal, korozija je prodrla duboko, a površina je neravnomjerno prekrivena oksidima. Površina uzoraka izloženih ruralnoj atmosferi je ravnomjerno prekrivena tankim slijem oksida i ima lijepu crveno-smeđu boju.

Na poglodanim površinama oksidni sloj je puno manje homogen nego na originalnoj, nepoglodanoj površini.

U području metala zavara uočen je veći intenzitet korozije nego u osnovnom materijalu.

- Oksidni sloj na uzorcima koji su bili izloženi djelovanju industrijske atmosfere je oko 30 % deblji, a na uzorcima koji su bili izloženi morskoj atmosferi gotovo 100 % deblji u odnosu na uzorke iz ruralne atmosfere. Debljina sloja na svim uzorcima je veća na poglodanoj (tjemenoj) strani nego na originalnoj strani. Kod uzoraka iz morske atmosfere korozija je dublje prodrla zbog čega je površina hrapavija u odnosu na druge uzorke.
- EDS linijskom analizom utvrđena je prisutnost željeza i kisika u površinskom sloju što je u skladu s određenom debljinom oksidnog sloja.

## 8. LITERATURA

- [1] Filetin T., *Izbor materijala pri razvoju proizvoda*, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, 2000.
- [2] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Konstruktivski\\_%C4%8Delik](https://hr.wikipedia.org/wiki/Konstruktivski_%C4%8Delik), 25.03.2017.
- [3] Filetin T., Kovačiček F., Indof J., *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, Zagreb 2011.
- [4] Pongrac M., *Materijali za tlačne posude*, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, 2016.
- [5] ] [https://tkojetko.irb.hr/documents/8305\\_1662.pdf](https://tkojetko.irb.hr/documents/8305_1662.pdf), 26.03.2017.
- [6] Stefanivski T., *Utjecaj temperature na efikasnost antikorozivne zaštite konstrukcijskog čelika primjenom ekološkog inhibitora*, Diplomski rad, Metalurški fakultet u Sisku, 2015.
- [7] Rakić H., *Tehnološka svojstva temeljnih radioničkih premaza*, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, 2013.
- [8] Belov H., Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, 2009.
- [9] Juraga I., Alar V., Šimunović V., Stojanović I., *Predavanje: Korozija i metode zaštite od korozije*, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu - [https://www.fsb.unizg.hr/korozija/PROIZVODNI\\_POSTUPCI.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/korozija/PROIZVODNI_POSTUPCI.pdf)
- [10] Koren D., *Osnove korozije i zaštita konstrukcije primjenom premaza*, Završni rad br. 176/PS/2016, Sveučilište Sjever u Varaždinu, 2016.
- [11] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Korozija#Kemijska\\_korozija](https://hr.wikipedia.org/wiki/Korozija#Kemijska_korozija), 02.04.2017.
- [12] Martinez S., *Predavanje: Elektrokemijska korozija materijala*, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije u Zagrebu
- [13] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Zemljina\\_atmosfera](https://hr.wikipedia.org/wiki/Zemljina_atmosfera), 10.04.2017.
- [14] Vujičić A., *Nove mogućnosti primjene parnofaznih inhibitora korozije u zaštiti izoliranih cijevi od ugljičnog čelika*, Završni rad, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije u Zagrebu, 2012.

- [15] AZO Materials, *Weathering Steel: A Guide to Corten and the A/B Equivalents, Origins & Standards*, članak br. 12974, 2016., <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=12974>, 01.02.2017.
- [16] Total Materia, *Atmospheric Corrosion Resistant CORTEN Steel*, članak, 2010., <http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=274>, 01.02.2017.
- [17] Otmačić – Ćurković H., Marušić K., Stupnišek – Lisac E., *Predavanje: Zaštita patinirane i čiste bronce ekološki prihvatljivim inhibitorima korozije*, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije u Zagrebu, [http://akm.hkdrustvo.hr/AKM\\_arhiva/AKM12/AKM2008\\_radionice/Konz\\_restaur/AKM2008\\_Otmacic-Curkovic\\_Marusic\\_Stupnisek-Lisac.ppt](http://akm.hkdrustvo.hr/AKM_arhiva/AKM12/AKM2008_radionice/Konz_restaur/AKM2008_Otmacic-Curkovic_Marusic_Stupnisek-Lisac.ppt), 02.02.2017.
- [18] <http://www.hogtownsheetmetal.com/blog>, 02.02.2017.
- [19] <http://www.gradjevinarstvo.rs/tekstovi/5187/820/estetika-rdje-korten-celik>, 02.02.2017.
- [20] <http://www.corten-a-b.com/products-con/Corten-A-steel-plate.html>, 04.02.2017.
- [21] <http://www.corten-a-b.com/products-con/Corten-B-steel-plate.html>, 04.02.2017.
- [22] <http://documents.tips/documents/bs-en-1090-2-2011.html>, 07.02.2017.
- [23] <http://tigzavarivanje.com/zavarivanje-rel-postupkom/>, 07.02.2017.
- [24] <http://www.ram-rijeka.com/c/931/Osnovni-postupci-zavarivanja---Ram-Rijeka.wshtml>, 07.02.2017.
- [25] Garašić I., *Predavanje: REL zavarivanje*, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1398155757-0-rel\\_zav1.ppt](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1398155757-0-rel_zav1.ppt), 10.02.2017.
- [26] <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/postupci1.pdf>, 18.02.2017.
- [27] [http://www.wikiwand.com/sh/Zavarivanje MIG postupkom](http://www.wikiwand.com/sh/Zavarivanje_MIG_postupkom), 10.02.2017.
- [28] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje MIG postupkom](https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje_MIG_postupkom), 10.02.2017.
- [29] Garašić I., *Predavanje: MIG/MAG – Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog/aktivnog plina*, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1398155789-0-mig\\_magzav1.ppt](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1398155789-0-mig_magzav1.ppt), 10.02.2017.
- [30] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje pod pra%C5%A1kom](https://hr.wikipedia.org/wiki/Zavarivanje_pod_pra%C5%A1kom), 19.02.2017.

- [31] <http://allsteelsculpture.com/history-of-corten-sculptures>, 15.02.2017.
- [32] <http://blog.gardoo.co.uk/the-history-of-corten-steel/>, 15.02.2017.
- [33] <https://hiveminer.com/Tags/corten,deere>, 15.02.2017.
- [34] [https://en.wikipedia.org/wiki/Weathering\\_steel](https://en.wikipedia.org/wiki/Weathering_steel), 15.02.2017.
- [35] [https://www.google.hr/search?q=Barclays+Center+in+Brooklyn&client=firefox-b-ab&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjmc\\_khOrRAhULuRQKH6gD4oQ\\_AUIC\\_CgB&biw=1366&bih=635#imgsrc=dPgex1iut9qESM%3A](https://www.google.hr/search?q=Barclays+Center+in+Brooklyn&client=firefox-b-ab&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjmc_khOrRAhULuRQKH6gD4oQ_AUIC_CgB&biw=1366&bih=635#imgsrc=dPgex1iut9qESM%3A), 15.02.2017.
- [36] [http://www.e-architect.co.uk/images/jpgs/leeds/broadcasting\\_place\\_f251010\\_wpp1.jpg](http://www.e-architect.co.uk/images/jpgs/leeds/broadcasting_place_f251010_wpp1.jpg), 15.02.2017.
- [37] [http://www.steelconstruction.info/Weathering\\_steel](http://www.steelconstruction.info/Weathering_steel), 15.02.2017.
- [38] <https://www.expedia.com/New-River-Gorge-Bridge-Fayetteville.d6093909.Vacation-Attraction>, 15.02.2017.
- [39] Whysall S., *Corten: The stuff of art and architecture*, članak, Vancouver Sun, 2012. <http://vancouversun.com/news/staff-blogs/corten-the-stuff-of-art-and-architecture>, 15.02.2017.
- [40] <http://www.chicagodetours.com/2012/09/answers-to-questions-of-chicago-history-and-architecture/>, 15.02.2017.
- [41] [http://www.dailygalaxy.com/my\\_weblog/2016/08/humans-are-bombarded-by-10-billion-photons-per-second-from-intergalactic-space.html](http://www.dailygalaxy.com/my_weblog/2016/08/humans-are-bombarded-by-10-billion-photons-per-second-from-intergalactic-space.html), 15.02.2017.
- [42] [http://peace.maripo.com/x\\_us\\_in.htm](http://peace.maripo.com/x_us_in.htm), 15.02.2017.
- [43] [http://www.artbahrain.org/archives/sept2011/artguide\\_museum\\_Venet\\_Versailles\\_sept.php](http://www.artbahrain.org/archives/sept2011/artguide_museum_Venet_Versailles_sept.php), 19.02.2017.
- [44] <http://www.corten-a-b.com/products-con/S355J0WP-steel-plate.html>, 19.02.2017.
- [45] D. de la Fuente, I. Díaz, J. Simancas, B. Chico, M. Morcillo, *Long-term atmospheric corrosion of mild steel*, Corrosion Science 53 (2011) 604–617

## PRILOZI

### Prilog 1. Tablica zavarivanja

Tablica 17. Tablica zavarivanja

Postupak zavarivanja	111 – Ručno elektrolučno zavarivanje
Položaj zavarivanja	PC (os: nagnuta os, prema gore) – 18 slojeva
Temperatura predgrijavanja ( $t_p$ )	80 °C
Međuslojna temperatura ( $T_m$ )	250 °C
Osnovni materijal	S355J0WP+WR
Dimenzija (OM)	20 mm
Šarža (OM)	730618491
Klasa dodatnog materijala	HRN EN ISO 2560-A: E 46 4ZB 42 H5
Dimenzija (DM)	Ø 3,25
Trgovački naziv (DM)	EVb CuNi
Broj šarže (DM)	126159